Моделирование спутниковой СВЧ-радиометрической информации, используемой для восстановления трёхмерных полей атмосферных параметров

В. П. Саворский¹, А. Б. Аквилонова¹, Д. М. Ермаков¹, И. Н. Кибардина¹,
О. Ю. Панова¹, М. Т. Смирнов¹, С. Ю. Турыгин², А. П. Чернушич¹

¹ *Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
Фрязинский филиал, Фрязино, 141190, Россия
E-mail: savor@inbox.ru*

² *Специальное конструкторское бюро Института радиотехники
и электроники им. В. А. Котельникова РАН, Фрязино, 141190, Россия
E-mail: tur@sdbireras.ru*

Развитие средств контроля температурно-влажностных характеристик атмосферы остаётся в ряду наиболее актуальных задач спутникового мониторинга Земли. Одним из самых перспективных направлений в данной области является применение СВЧ-радиометрических спутниковых средств наблюдения. Прежде всего, это связано с созданием СВЧ-радиометрических гиперспектрометров, позволяющих регистрировать непрерывные спектры СВЧ-излучения системы «атмосфера — подстилающая поверхность» в диапазоне 10–200 ГГц с высоким разрешением. При таком подходе выбор и конфигурация каналов СВЧ-радиометрической системы является критически важной задачей, решение которой необходимо обеспечить уже на этапе проектирования и создания СВЧ-радиометрической аппаратуры. Именно поэтому успешная реализация проектов разработки СВЧ-радиометрического гиперспектрометра требует создания специального программного обеспечения для моделирования, которое позволит решать следующие задачи проекта: выбор оптимальных технических решений, их проверка в процессе тестирования и обеспечение основы для выполнения обратных задач в последующем тематическом анализе экспериментальных данных. В работе представлена методология разработки программного обеспечения для моделирования СВЧ-радиометрических измерений системы «атмосфера — подстилающая поверхность» в диапазоне 10–200 ГГц, описана программная реализация процедур моделирования и показаны примеры применения этих процедур для статистического описания атмосферных профилей.

Ключевые слова: программное обеспечение, радиояркость, температура, прогнозирование погоды, влажность, температурно-влажностный профиль

Одобрена к печати: 03.04.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-235-250

Введение

Для экологических целей необходимо контролировать аномалии в профилях температуры и водяного пара около поверхности Земли с точностью, существенно лучшей, чем величины естественных вариаций этих параметров, составляющие 7 К и 3,4 % соответственно (Зуев, Комаров, 1986). Решение проблемы оперативного выявления такого типа аномалий, как следует из результатов работ (Blackwell et al., 2010, 2011), может быть получено посредством восстановления атмосферных профилей по данным спутниковых микроволновых гиперспектральных радиометров (МВГР). При этом конфигурация радиометрической системы определяется, как показано в статье (Lipton, 2003), путём минимизации среднеквадратических ошибок восстановления атмосферных профилей по заданным статистическим характеристикам атмосферы, якобиану модельной функции и шумовым характеристикам самой СВЧ-радиометрической системы. Эта идея в конечном итоге и была реализована в концепции МВГР с многочисленными областями приложения (Boukabara, Garret, 2011).

Оценки, проведённые в работе (Blackwell et al., 2011), указывают на перспективность МВГР для восстановления профилей метеопараметров атмосферы. В частности, показано,

что МВГР позволяет уменьшить среднеквадратичные ошибки восстановления профиля температуры атмосферы в среднем на 0,5 К и влажности на 5 % по сравнению с результатами восстановления при использовании данных традиционных инструментов, таких как AMSU-A и AMSU-B. Эти результаты обусловлены, в частности, высокой плотностью весовых функций (Aires et al., 2015; Blackwell et al., 2011), что подтверждает перспективность применения именно гиперспектрометров миллиметрового диапазона.

Сказанное выше мотивирует выбирать МВГР как решение, обладающее высоким потенциалом для возможности его использования при исследованиях аномалий в нижней тропосфере. Для успешной реализации проекта создания МВГР на первом этапе необходимо разработать специальное программное обеспечение (СПО) для моделирования. Как следует из результатов работы (Lipton, 2003), это СПО должно поддерживать решение следующих задач проекта: выбор оптимальных технических решений для конфигурации СВЧ-радиометрического комплекса; возможность проверки эффективности работы СВЧ-радиометрического комплекса как в рамках численного моделирования, так и при проведении испытаний; обеспечение программно-методической основы для решения обратных задач при последующем тематическом анализе экспериментальных данных. Разработка такого СПО и составляет основную цель настоящей работы.

Моделирование радиояркостных особенностей атмосферных аномалий

Оценки радиоизлучения атмосферы основаны главным образом на зависимостях интенсивностей теплового излучения от атмосферных профилей температуры и водяного пара. Эти оценки относятся к категории прямых математических задач дистанционного зондирования. Поэтому можно ожидать, что небольшие изменения параметров атмосферы незначительно повлияют на характеристики радиоизлучения, а расчётные оценки будут стабильными. При этом следует учитывать тот факт, что реальные расчёты осложняются некоторыми актуальными проблемами, для решения которых необходимо:

- 1) разработать модели атмосферы, описывающие среднестатистические особенности формирования радиотеплового излучения в сантиметровом – миллиметровом диапазонах в заданном ансамбле атмосферных состояний, присущих для заданной природно-климатической зоны в определённый сезонный период;
- 2) наряду с использованием зональных моделей развивать «точечные» модели, описывающие атмосферные характеристики в окрестности заданной метеостанции (или ряда станций в заданной природно-климатической зоне), полученные в результате анализа многолетних рядов измерений в этой окрестности;
- 3) создать трёхмерные модели атмосферных возмущений, учитывающие корреляции между атмосферными слоями в пределах отдельных горизонтальных слоёв;
- 4) включить в состав каналов проектируемой СВЧ-радиометрической системы каналы, соответствующие крыльям линий поглощения водяного пара и кислорода, с тем чтобы обеспечить мониторинг приповерхностных слоёв атмосферы, а именно нижней тропосферы;
- 5) получить оценки априорной матрицы ошибок восстановления атмосферных профилей, с тем чтобы оценить информационную ёмкость проектируемой СВЧ-радиометрической системы;
- 6) разработать программно-методические средства восстановления атмосферных профилей по данным СВЧ-радиометрических систем с использованием метода статистической регуляризации, в том числе включающие и средства оценки априорных ошибок восстановления;
- 7) разработать научно-методические основы, реализующие программное обеспечение для тестирования разработанных программных средств с использованием доступных экспериментальных данных по атмосферным профилям, в частности с использованием данных радиозондовых измерений атмосферных профилей.

Методология моделирования атмосферных аномалий

«Аномальное» состояние атмосферы следует рассматривать как значительное отклонение его геофизических характеристик (в нашем случае температуры и содержания водяного пара) от некоторых ожидаемых эталонных значений. Будучи динамичной системой, атмосфера характеризуется постоянными вариациями своих параметров, поэтому ключевой задачей является оценка степени важности зарегистрированных отклонений в качестве доказательства аномалии. Поскольку поиск причины аномалии является первостепенным вопросом, оценки требуют априорной информации о типичном (ожидаемом или контрольном) состоянии атмосферы. В настоящее время такая информация в основном представляет собой обобщение метеорологических наблюдений и результатов численного моделирования. Её пополнение (и в будущем — значительное уточнение) необходимо осуществлять регулярными спутниковыми данными.

В первом приближении пространственное распределение средних статистических характеристик атмосферы можно рассматривать как имеющее только меридиональную зависимость, т.е. являющуюся одномерной функцией широты. Таким образом, широко используются зональные модели атмосферы, где каждая из зон относится к определённому интервалу широты. В этом случае каждая зона характеризуется собственным набором статистических параметров атмосферы. Такой подход игнорирует влияние поверхности Земли и взаимное расположение водных и земельных участков. Последнее обстоятельство является одним из потенциальных источников отличий в моделях, которые получаются путём усреднения данных, либо относительно разреженных в пространстве, либо различных по наборам наблюдений.

Сезонность существенно влияет на характеристики атмосферы, поэтому дальнейшее упрощение статистических моделей обеспечивается за счёт учёта как минимум двух стационарных моделей — зимних и летних — для каждой климатической зоны. При этом очевидная разница в стандартных моделях сезонных зон должна быть обусловлена сложным взаимодействием между атмосферой, океаном и землёй.

При изучении высотных профилей температуры и водяного пара атмосферы наиболее острые проблемы обусловлены необходимостью учёта атмосферной воды в различных фазовых состояниях. Водяной пар является быстро меняющейся газовой составляющей атмосферы, фазовые переходы которой в значительной степени определяют энергетический баланс атмосферных процессов в широких пространственных и временных масштабах. Адекватное понимание и описание взаимодействия между этими процессами требует длительного глобального регулярного мониторинга. В настоящее время наиболее перспективным подходом для поиска и оценки параметров атмосферных аномалий (аналогично тому, как в случае решения проблем климатического моделирования) представляется комплексное использование множества стандартных или авторских моделей и сочетания любых разумных наборов из них. С этой точки зрения разработанная система программного обеспечения должна быть универсальной в отношении использования входной информации, предоставляемой в различных стандартных или авторских моделях атмосферы.

При разработке СПО следует предпочесть модели атмосферы, которые позволяют создавать обучающие массивы данных, включающие не только средние статистические значения, но и статистики второго порядка, т.е. корреляционные или ковариационные матрицы вариаций профиля атмосферы. Это даёт возможность более точно статистически моделировать вертикальный профиль. При таком подходе неприменимы так называемые модели стандартной атмосферы, например стандартная модель США (McClatchey et al., 1972; U.S. Standard..., 1976). Несмотря на то, что в авторской модели (Зуев, Комаров, 1986) приведены корреляционные или ковариационные матрицы вариаций профиля атмосферы, она также не может быть использована для целей данной работы, поскольку приведённые в ней профили влажности не описывают параметры на высотах более 7 км, а для корректного определения радиояркостной температуры системы «атмосфера — подстилающая поверхность» в диапазоне 10–20 ГГц, по нашим оценкам, необходимо задавать профили до высот порядка 25–30 км.

Поэтому в данной работе были использованы статистические параметры атмосферы, полученные нами в результате статистической обработки данных радиозондовых измерений атмосферных профилей, содержащихся в так называемой «тренировочной» базе данных SeeBor (Borbas et al., 2005). Данные «тренировочной» базы данных адаптированы для настройки процедур восстановления или усвоения в процедурах численного прогноза погоды (Cardinali, 2009; Chevallier et al., 2006), что особенно ценно для исследований мезомасштабных изменений атмосферы.

«Тренировочный» набор данных SeeBor (Borbas et al., 2005) позволяет создавать различные модели в зависимости от требований к зоне и сезону. Профили SeeBor выбраны из наборов данных радиозондовых измерений NOAA-88, ECMWF 60L, TIGR-3, лабораторий мониторинга и диагностики климата NOAA (CMDL) и атмосферы Сахары с 2004 г. Набор SeeBor состоит из 15704 атмосферных профилей температуры, влажности и озона для 101-го уровня давления при условии ясного неба. В дополнение к глобальному предоставлению данных радиозондов этот «тренировочный» набор обладает достаточными возможностями для предоставления зональных данных. Например, в нём содержится более 2200 профилей зондирования летней атмосферы для северных средних широт. Таким образом, объём данных набора SeeBor даёт возможность создавать устойчивые и репрезентативные оценки такой важной статистической информации, как корреляционные величины. При этом для восстановления трёхмерных профилей необходим учёт корреляционных связей как в вертикальном направлении, т. е. между атмосферными слоями, так и в горизонтальном, т. е. в пределах каждого из атмосферных слоёв.

При появлении в вертикальном слое атмосферы $z_i \in [i\Delta h, (i+1)\Delta h]$ (Δh — толщина слоя) возмущения в температурном профиле величиной ΔT_i вследствие взаимной вертикальной коррелированности с вариациями атмосферных параметров в слое $z_j \in [j\Delta h, (j+1)\Delta h]$ $i \neq j$ (Blackwell et al., 2010) математическое ожидание значения температуры T_j в j -м слое (в гауссовой статистике) будет задаваться следующим выражением:

$$T_j = \bar{T}_j + \gamma_{T_{ij}} \frac{\sigma_{T_j}}{\sigma_{T_i}} (T_i - \bar{T}_i) = \bar{T}_j + \gamma_{T_{ij}} \frac{\sigma_{T_j}}{\sigma_{T_i}} \Delta T_i. \quad (1)$$

Аналогично выражение для смоделированных значений возмущений в вертикальном профиле водяного пара ρ_j равно:

$$\rho_j = \bar{\rho}_j + \gamma_{\rho_{ij}} \frac{\sigma_{\rho_j}}{\sigma_{\rho_i}} (\rho_i - \bar{\rho}_i) = \bar{\rho}_j + \gamma_{\rho_{ij}} \frac{\sigma_{\rho_j}}{\sigma_{\rho_i}} \Delta \rho_i. \quad (2)$$

Здесь $\bar{T}_j$, $\bar{\rho}_j$ — математические ожидания температуры и влажности j -го слоя атмосферы; σ_{T_j} , σ_{ρ_j} — среднеквадратические вариации температуры и влажности j -го слоя атмосферы; $\gamma_{T_{ij}}$, $\gamma_{\rho_{ij}}$ — коэффициенты корреляции вариации температуры и влажности между i -м и j -м слоями атмосферы. Величины $\gamma_{T_{ij}}$, $\gamma_{\rho_{ij}}$ могут быть оценены непосредственно из результатов выборочного статистического анализа данных температурно-влажностного зондирования атмосферы, в частности из данных SeeBor (Borbas et al., 2005).

Корреляционные зависимости полей температуры и влажности вдоль земной поверхности задают величины горизонтальных статистических взаимосвязей внутри каждого из атмосферных слоёв (без учёта перемешивания). При этом ожидаемые значения изотропных однородных полей температуры в i -м слое атмосферы $T_i(\Delta_x)$, в зависимости от возмущения величиной $\Delta T_i(0)$, произошедшем на горизонтальном расстоянии Δ_x , задаются соотношениями:

$$T_i(\Delta_x) = \overline{T_i(\Delta_x)} + \tilde{a}_{T_i}(\Delta_x) [T_i(0) - \overline{T_i(0)}] = \overline{T_i(\Delta_x)} + \tilde{a}_{T_i}(\Delta_x) \Delta T_i(0). \quad (3)$$

Аналогично ожидаемые значения изотропных однородных полей влажности $\rho_i(\Delta_x)$ задаются соотношениями:

$$\rho_i(\Delta_x) = \overline{\rho_i(\Delta_x)} + \gamma_{\rho_i}(\Delta_x) \left[\rho_i(0) - \overline{\rho_i(0)} \right] = \overline{\rho_i(\Delta_x)} + \gamma_{\rho_i} \Delta \rho_i(0). \quad (4)$$

Здесь $\gamma_{T_i}(\Delta_x)$ и $\gamma_{\rho_i}(\Delta_x)$ — коэффициенты пространственной корреляции горизонтальных полей температуры и влажности. При моделировании корреляционные зависимости $\gamma_{T_i}(\Delta_x)$ и $\gamma_{\rho_i}(\Delta_x)$ в первом приближении могут быть заданы экспоненциально затухающими функциями с радиусами корреляции в диапазоне от 1 до 5 км.

Соотношения (1–4) определяют процедуры моделирования пространственных возмущений температурно-влажностных профилей, необходимые для оценки эффективности использования СВЧ-радиометрических средств исследования атмосферы.

Методика моделирования радиояркостных спектров системы «атмосфера – подстилающая поверхность»

Спектры поглощения СВЧ-излучения в атмосфере хорошо известны и могут быть охарактеризованы набором окон (окна прозрачности с низким уровнем поглощения), разделённых линиями резонансного поглощения отдельными компонентами газа. В первом приближении линии поглощения описываются их центральными частотами, спектральными ширинами и интенсивностями. Однако в случае космических наблюдений нижней тропосферы с помощью МВГР наибольший интерес представляют и точные спектральные зависимости поглощения на краях крыльев линий. Это связано с тем, что вариации атмосферного поглощения в этих спектральных полосах показывают изменения вариаций конкретных условий (температуры, давления) в нижней тропосфере. Описание этих частей спектра поглощения — переход от линий поглощения к так называемым континуальным частотным полосам — является самой большой проблемой для исследователей, поскольку теоретические расчёты, в силу их сложности, не полностью согласуются с имеющимися экспериментальными данными. Поэтому улучшение модели приводит к периодическому обновлению оценённых параметров спектров поглощения. Это создаёт необходимость оперативного включения обновлённой спектральной информации в процедуры оценки спектров, применяемые для расчётов поглощения атмосферы. С этой точки зрения наиболее подходящим для спектральных оценок микроволнового поглощения в атмосфере представляется пакет ARTS (Buehler et al., 2005; Eriksson et al., 2011).

Комплекс ARTS (Atmospheric Radiative Transfer Simulator) (Buehler et al., 2005; Eriksson et al., 2011) — это программный пакет расчёта переноса излучения в атмосфере, применяемый для оценки излучения в различных атмосферных ситуациях, наблюдаемых в естественных условиях Земли (Aires et al., 2015). В первую очередь ARTS был разработан для расчётов в микроволновом диапазоне (Buehler et al., 2005; Eriksson et al., 2011). Он обеспечивает поддержку с открытым исходным кодом, позволяющую проверять процедуры моделирования. Одной из очевидных преимуществ ARTS, хорошо подходящей для наших целей, является гибкость, которую ARTS предоставляет для включения различных модельных зависимостей в процедуры оценки. Именно гибкость конфигурации пакета позволяет оценить спектры радиоизлучения атмосферы в разных состояниях как для опорных, так и для возмущённых атмосферных профилей. Это подтверждается постоянными обновлениями источников спектральных данных. В частности, в настоящее время в пакете ARTS по умолчанию используется спектроскопическая база данных HITRAN2012 (Rothman et al., 2013).

Особое внимание в ARTS уделено выполнению расчётов поглощения СВЧ-излучения в диапазонах окон прозрачности. При этом ARTS позволяет использовать ряд полных моделей поглощения. Одним из преимуществ такого подхода является то, что «у пользователя есть гарантия, что полное поглощение для заданной составляющей атмосферы имеет значение, которое было задумано разработчиком модели» (Buehler et al., 2005). Это имеет смысл из-за эмпирической природы данных поглощения в окнах прозрачности атмосферы, т. е. в зонах спектрального континуума. Вместе с тем применяется процедура, предложенная в работе

(Clough et al., 1989), которая позволяет устранить разрывы в спектрах на срезах частоты, что очень важно для целей настоящей работы, поскольку, как упомянуто выше, обеспечивает точные оценки при исследовании нижних слоёв тропосферы.

Пакет ARTS предоставляет пользователям возможность учитывать различную информацию, которая характеризует радиационные процессы в атмосфере. Цели представленной работы требуют в основном применения погонного коэффициента поглощения (ПКП), рассчитываемого с помощью ARTS. Мы используем ПКП для расчёта суммарного поглощения атмосферы, интенсивности излучения (радиояркой температуры), матриц весовой функции (якобианов) температуры и влажности. Эти расчёты проведены с помощью инструментов СПО, разработанных в настоящей работе. Использование этих инструментов обусловлено необходимостью изучения изменений СВЧ-излучения в нижней тропосфере, где нужно учитывать и иметь возможность контролировать детали взаимодействия излучения с компонентами атмосферы в непосредственной близости от поверхности Земли.

Одной из основных целей работы является также разработка процедуры, которая позволяет определить чувствительность МВГР, что необходимо для исследования атмосферных аномалий. Требуемая минимальная чувствительность в заданном канале МВГР, данные которого предназначены для восстановления профилей водяного пара, может быть оценена (в первом приближении) по уровню максимально допустимых собственных шумов в заданном канале МВГР в соответствии с соотношениями:

$$\sigma_{T_b}^{(q)}(f) = \sigma_q(h) \frac{\partial T_b(f)}{\partial q(h)} = 1,6 \cdot 10^{-3} \sigma_q(h) \frac{\partial T_b(f)}{\partial s(h)}, \quad (5)$$

где $\sigma_q(h)$ — среднеквадратическое изменение массовой доли водяного пара на высоте h (Зуев, Комаров, 1986); $\partial T_b(f)/\partial q(h)$ — частная производная яркостной температуры заданного радиометрического канала спутникового радиометра от массовой доли водяного пара на высоте h в системе «атмосфера — поверхность Земли» при наблюдении в надир; $\partial T_b(f)/\partial s(h)$ — частная производная яркостной температуры заданного радиометрического канала спутникового радиометра от отношения смеси (VMR — volume mixing ratio) на высоте h системы «атмосфера — поверхность Земли» при наблюдении в надир.

Требуемая минимальная чувствительность в заданном канале МВГР, данные которого предназначены для восстановления термодинамических температурных профилей, может быть оценена (в первом приближении) по уровню максимально допустимых собственных шумов в заданном канале МВГР в соответствии с соотношением:

$$\sigma_{T_b}^{(T)}(f) = \sigma_T(h) \frac{\partial T_b(f)}{\partial T(h)}, \quad (6)$$

где $\sigma_T(h)$ — среднеквадратичное значение температуры на высоте h (Зуев, Комаров, 1986); $\partial T_b(f)/\partial T(h)$ — значение частной производной яркостной температуры заданного радиометрического канала спутникового радиометра от термодинамической температуры системы «атмосфера — поверхность Земли» на высоте h при наблюдении в надир относительно термодинамической температуры атмосферы.

Общая схема специального программного обеспечения для расчёта спектральных характеристик радиояркой температуры системы «атмосфера – подстилающая поверхность»

С целью реализации изложенного выше методического подхода был разработан программный комплекс «АТОС» для моделирования результатов зондирования температуры и влажности нижней тропосферы с помощью спутникового микроволнового радиометра. Этот программный комплекс, блок-схема которого представлена на *рис. 1* (см. с. 241), состоит из следующих основных программных блоков:

- 1) блок моделирования атмосферных профилей (БМАП) — создание возмущённых вертикальных профилей температуры и влажности атмосферы с учётом их пространственной корреляции в различных погодных и климатических условиях (см. примеры моделирования на *рис. 2*);
- 2) блок расчёта спектров поглощения (БРСП) — оценка спектров излучения системы «атмосфера — поверхности Земли» в миллиметровом — сантиметровом диапазонах, наблюдаемых с аэрокосмических платформ, с использованием ARTS (Buehler et al., 2005; Eriksson et al., 2011) и спектральной базы данных HITRAN (Rothman et al., 2013) (расчёты погонного поглощения для разных высот представлены на *рис. 3*, см. с. 242);
- 3) блок расчёта радиояркостной температуры (БРРТ) — расчёт радиометрических откликов и весовых функций системы «атмосфера — поверхность Земли» с возмущёнными вертикальными профилями температуры и/или влажности (расчётные спектры наблюдаемой спутниковыми системами радиояркостной температуры для разных высот представлены на *рис. 4*, см. с. 242);
- 4) блок расчёта функций чувствительности (БРФЧ) — первый шаг оценки информационной ёмкости MWS для исследования атмосферы (результаты расчёта функций чувствительности для оценки температуры и влажности по формулам (5), (6) показаны на *рис. 5* и *6*, см. с. 242, 243).

Анализ *рис. 5* и *6* показывает,

- 1) что наиболее перспективным для восстановления профилей термодинамической температуры на высотах 0,5–5 км является диапазон 165–180 ГГц (как вариант может быть выбран диапазон 185–200 ГГц), поскольку весовые функции в этих диапазонах слабо зависят от излучения подстилающей поверхности, имеют хорошую частотную избирательность по высоте и достаточно высокие показатели предельной чувствительности порядка 0,40–0,55 К, избирательность по высоте может быть обеспечена приёмом в нескольких каналах с полосой пропускания порядка 1 ГГц;

Рис. 1. Общая структурная схема программного комплекса «АТОС»

Рис. 2. Профили температуры (а) и влажности (б) атмосферы. Данные SeeBor (Borbas et al., 2005) для летнего периода средних широт

Рис. 3. Погонное поглощение для невозмущённой атмосферы, представленной на рис. 2. Данные SeeBor (Borbas et al., 2005) для летнего периода средних широт

Рис. 4. Спектр радиоярких температур радиоизлучения системы «атмосфера – поверхность Земли» (коэффициент излучения поверхности 0,95). Данные SeeBor (Borbas et al., 2005) для летнего периода средних широт

Рис. 5. Чувствительность МВ-радиометра для определения атмосферных профилей температуры. Данные SeeBor (Borbas et al., 2005) для летнего периода средних широт

Рис. 6. Чувствительность МВ-радиометра для определения атмосферных профилей влажности. Данные SeeBor (Borbas et al., 2005) для летнего периода средних широт

- 2) альтернативным для восстановления профилей термодинамической температуры на высотах 0,5–5 км является диапазон 50–55 ГГц (как вариант может быть выбран диапазон 65–70 ГГц), поскольку весовые функции в этом диапазоне слабо зависят от излучения подстилающей поверхности, имеют приемлемую частотную избирательность по высоте и приемлемые показатели предельной чувствительности порядка 0,15–0,20, избирательность по высоте может быть обеспечена приёмом в нескольких каналах с полосой пропускания порядка 150–400 МГц;
- 3) для восстановления профилей температуры на высотах 0,5–2 км необходимо привлекать данные измерений в диапазонах 130–150 ГГц (вариант 100–115 ГГц), предельная чувствительность составляет 0,30–0,45 К, избирательность по высоте может быть обеспечена приёмом в нескольких каналах с полосой пропускания до 5 ГГц.

Расчёт степеней свободы СВЧ-радиометрической системы как атмосферного зондировщика

В приближении линейной модели расчётные значения радиоярких температур T_{mod} относительно реально измеренных значений T можно представить, как:

$$T - T_{\text{mod}}(x_a) = \frac{\partial T_{\text{mod}}}{\partial x}(x - x_a) + \varepsilon = K(x - x_a) + \varepsilon, \quad (7)$$

где $K = [K_{ij}] = \left[\frac{\partial T_{\text{mod}_i}}{\partial x_j} \right]_{x=x_a}$ — матрица Якоби, определяемая частными производными ком-

понентов вектора наблюдаемых значений радиояркой температуры T_j относительно компонентов вектора параметров атмосферы x_j , описывающего температурно-влажностные высотные профили атмосферы вблизи априорно заданных значений $x = x_a$. Обычно компоненты вектора состояний описывают значения какого-то одного из параметров состояния, например температуры или влажности, на разных высотах. Это обусловлено тем, что в большинстве случаев якобиан хорошо разделяется по частотам для разных параметров. Но в общем случае вполне возможно использовать и единый вектор состояния, в котором компоненты включают оба параметра состояния, т.е. и температуру, и влажность, а также отражают не только высотную изменчивость, но и горизонтальную. Здесь ε — вектор ошибок измерений, определяемый в нашем случае значениями собственных шумов СВЧ-радиометрической системы.

Зададим априорную статистику ансамбля состояний x атмосферы гауссовым распределением относительно некоторого среднего по ансамблю значения, т.е. математического ожидания, $x_a = M\{x\}$ (Rodgers, 1996, 2000):

$$P(x) = \frac{1}{(2\delta)^{n/2} |S_a|^{1/2}} \exp \left\{ -0,5(x - x_a)^T S_a^{-1} (x - x_a) \right\}, \quad (8)$$

где S_a — априорная ковариационная матрица вектора состояний параметров атмосферы, определяемая как математическое ожидание:

$$S_a = M \left\{ (x - x_a)^T \right\}. \quad (9)$$

В рамках гауссовой модели апостериорная оценка состояния атмосферы $\hat{x}$ (т.е. восстановленное значение атмосферных параметров) имеет гауссову апостериорную функцию с ковариацией (Rodgers, 1996):

$$\hat{S} = S_a - S_a K^T (K S_a K^T + S_s)^{-1} K S_a, \quad (10)$$

или в эквивалентном выражении:

$$\hat{S}^{-1} = K^T S_s K + S_a^{-1}. \quad (11)$$

Здесь ковариационная матрица ошибок измерений:

$$S_s = M \left\{ \epsilon \epsilon^T \right\} \quad (12)$$

представлена в виде, учитывающем, что $M\{\epsilon\} = 0$.

Ковариационная матрица $\hat{S}$ используется при оптимизации для оценки степеней свободы d_s (Lipton, 2003; Rodgers, 1996, 2000) СВЧ-радиометрической системы в задачах восстановления атмосферных профилей, являющейся мерой информационной ёмкости СВЧ-радиоспектрометров, отражающей степень апостериорного улучшения оценок атмосферных параметров по данным СВЧ-радиометрических наблюдений:

$$d_s = \text{trace}(I - \hat{S}). \quad (13)$$

Расчёты информационных возможностей СВЧ-радиометрической системы получены для того же тренировочного набора данных SeeBor для летней (с апреля по сентябрь) атмосферы умеренных широт (30–60 с.ш.). Для указанного подмножества из набора данных были определены средние по выбранному множеству значения профилей температуры и влажности и ковариационные матрицы вариаций вертикальных профилей этих параметров. Полученные оценки вертикальных профилей использованы для определения радиоярких температур системы «атмосфера — подстилающая поверхность», а также для вычисления весовых функций этих температур к вариациям температурно-влажностных профилей атмосферы.

Собственные шумы каналов СВЧ-радиометрических систем независимы, т.е. взаимно не коррелированы. Поэтому ковариационная матрица ошибок измерений S_s является диагональной, т.е. $S_s = \sigma_i^2 I$, где σ_i — интенсивность собственных (инструментальных) шумов СВЧ-радиометрической системы в i -м канале.

На рис. 7 в качестве примера работы созданного программного обеспечения (ПО) расчёта информационной ёмкости СВЧ-радиометрической системы для восстановления параметров атмосферы приведены результаты расчёта информационной ёмкости СВЧ-радиоспектрометрического метрического комплекса, функционирующего на склоне линии поглощения водяного пара вблизи 183 ГГц. Моделировались СВЧ-спектрометры с полосами частот 10 и 20 ГГц и спектральным разрешением 1 ГГц, зондирующие со спутника в надир. Начало спектральных полос менялось в диапазоне от 160 до 185 ГГц. Излучательная способность земной поверхности была принята равной 0,95, а собственные шумы во всех каналах — одинаковыми и принимающими значение от 0,01 до 0,1 К.

Рис. 7. Число степеней свободы d_s спутниковых СВЧ-радиометрических спектрометров диапазона 160–185 ГГц. Данные SeeBor (Borbas et al., 2005) для летнего периода средних широт

Рис. 8. Зависимость числа степеней свободы d_s спутниковых СВЧ-радиометрических спектрометров диапазона 160–180 ГГц от интенсивности собственных шумов СВЧ-радиометрической системы. Данные SeeBor (Borbas et al., 2005) для летнего периода средних широт

На рис. 7 видно, что для полосы 10 ГГц наиболее информативным для восстановления профилей температуры является применение спектрометра со спектральной полосой 173–183 ГГц. Полоса в 20 ГГц, в случае когда она захватывает этот участок спектра, т. е. начиная с $f_{\min} = 163$ ГГц, также показывает относительно высокую информативность, где можно использовать 4–5 каналов измерений. Следует также отметить повышение информативности при снижении уровня собственных шумов СВЧ-радиометрической системы с 0,1 до 0,03 К.

Зависимость числа степеней свободы d_s СВЧ-радиометрических спектрометров диапазона 160–185 ГГц, применяемых для восстановления вертикальных профилей температуры, от точности измерений (интенсивности собственных шумов радиометров) приведена на рис. 8.

График на рис. 8 удовлетворительно аппроксимируется зависимостью:

$$\hat{d} = -0,7 \ln(\sigma) + 2,95. \quad (14)$$

Методика выбора априорной метеорологической информации для локального моделирования

Набор SeeBor не позволяет исследовать статистические параметры атмосферы для отдельных точек (станций) наблюдения, поскольку не содержит достаточного объема данных по отдельным точкам на земной поверхности. Эти объемы в SeeBor настолько малы, что не составляют ни продолжительных рядов наблюдений, ни коротких, но выбранных с большой частотой их подмножеств.

Поэтому в рамках настоящей работы были использованы исходные радиозондовые данные, необходимые для определения статистических характеристик атмосферы в окрестностях отдельных станций или некоторого выбранного ряда станций. Ввиду отсутствия в открытом доступе отечественного источника радиозондовой информации в объеме, достаточном для получения достоверных статистических оценок, в качестве источника данных использован сервер Университета штата Вайоминг (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>). При этом для работы были отобраны станции, имеющие достаточно продолжительные ряды измерений (не менее 20–30 лет). Основной состав формируемого массива информации по радиозондовым измерениям составили данные о состоянии атмосферы вдали от крупных городов, за исключением данных со станций Воейково (Санкт-Петербург), Долгопрудный (Московская обл.) и Нижний Новгород. В выборку включены станции на европейской территории России и в Сибири. Процесс сбора данных за период в один год был полностью автоматизирован

программой Automatic Mouse and Keyboard Version 5.2.9.2, которая была взята на сайте компании Robot Soft (<http://www.robot-soft.com>). Время скачивания информации за один год составляет примерно 7–10 мин.

В таблице приведён список отобранных на первом этапе станций с указанием их международного номера, координат и периода, данные по которому включены в формируемый архив радиозондовой информации. Эти данные сформировали в ИРЭ РАН базу данных радиозондирования (БДРЗ), предназначенную для проведения оценок информационной ёмкости СВЧ-радиометрических зондировщиков атмосферы.

Метеостанции, данные по которым включены в ИРЭ БДРЗ

Номер станции	Название станции	Координаты		Период		Количество сеансов за весь период измерений	Климатическая зона
		Широта, град	Долгота, град	Начало	Конец		
27612	Долгопрудный	55,75	37,95 в. д.	01.1973	09.2017	36709	Европейская часть России (умеренные широты)
27459	Нижний Новгород	56,26	44,00 в. д.	01.1998	12.2016	11611	
27707	Сухиничи (Калужская обл.)	54,09	35,34 в. д.	01.1973	12.2016	24171	
27730	Рязань	54,63	39,70 в. д.	08.1994	12.2016	13661	
34172	Саратов	51,56	46,03 в. д.	01.1973	12.2016	23823	
34247	Калач (Воронежская обл.)	50,40	41,04 в. д.	01.1983	12.2016	17142	
26063	Воейково (Санкт-Петербург)	59,95	30,70 в. д.	01.1974	12.2016	31390	Побережье Балтийского моря
29231	Колпашево (Томская обл.)	58,31	82,94 в. д.	01.1973	12.2016	29730	Западная Сибирь
23884	Бор (Красноярский край)	61,59	90,01 в. д.	01.1973	12.2016	30272	Центральная Сибирь
30230	Киренск (Иркутская обл.)	57,76	108,07 в. д.	01.1973	12.2016	33659	
72293	Сан Диего (США)	32,8	117,12 з. д.	01.1990	12.2016	19356	Западное побережье США

Рис. 9. Профили температуры атмосферы по данным метеозондирования на станции Долгопрудный в безоблачные ночи августа 1974–2017 гг.

Рис. 10. Профили влажности атмосферы по данным метеозондирования на станции Долгопрудный в безоблачные ночи августа 1974–2017 гг.

Рис. 11. Матрица корреляций вариаций температур воздуха слоёв атмосферы в диапазоне давлений от 975 гПа (уровень 1) до 25 гПа (уровень 39)

На рис. 9 (см. с. 246) и 10 (см. с.) в качестве примера представлено множество реализаций радиозондовых измерений безоблачной атмосферы станции Долгопрудный в августе за период с 1974 по 2017 г. Эти данные использовались для определения статистических характеристик атмосферы по всему ансамблю измерений. Для этого в рамках работы было разработано специальное ПО RZ_Analyser, обеспечивающее получение статистических оценок атмосферных профилей, необходимых для определения информационной ёмкости

СВЧ-радиометрических средств наблюдения для выбранных метеостанций за заданный период, сезон, с выбранным интервалом повторения. В качестве примера на *рис. 11* показана корреляционная матрица для указанного ансамбля радиозондовых данных для 39 эквидистантных по давлению слоёв атмосферы в диапазоне 972–25 ГПа.

Выводы

Основным результатом работы является разработка пакета СПО «АТОС». Набор основан на оригинальной методологии авторов. Разработанный программный пакет предоставляет возможности для моделирования температуры и влажности нижней тропосферы с помощью спутниковой СВЧ-радиометрической системы. Тем самым обеспечивается выбор оптимальных технических решений, их проверка в процессе испытаний и опытной эксплуатации. Важно также то, что в рамках работы созданы программно-методические средства для решения обратных задач, что обеспечивает перспективу для дальнейшего тематического анализа экспериментальных данных. Следует также отметить созданное в рамках работы ПО RZ_Analyser, которое обеспечивает получение статистических оценок атмосферных профилей для выбранных метеостанций за заданный период, сезон, с выбранным интервалом повторения. Тем самым создаётся основа для тонкой настройки априорных статистик температурно-влажностных профилей в заданной локальной зоне наблюдений, что является одним из наиболее существенных факторов повышения точности восстановления атмосферных профилей по данным спутниковых СВЧ-радиометрических наблюдений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 16-07-00956).

Литература

1. Зуев В. Е., Комаров В. С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 264 с.
2. Aires F., Prigent C., Orlandi E., Milz M., Eriksson P., Crewell S., Lin C.-C., Kangas V. Microwave hyperspectral measurements for temperature and humidity atmospheric profiling from satellite: The clear-sky case // J. Geophysical Research: Atmospheres. 2015. V. 120. P. 11334–11351.
3. Blackwell W.J., Leslie V.R., Pieper M.L., Samra J.E. All-Weather Hyperspectral Atmospheric Sounding // Lincoln Laboratory J. 2010. V. 18. No. 2. P. 28–47.
4. Blackwell W.J., Bickmeier L.J., Leslie R.V., Pieper M.L., Samra J.E., Surussavadee C., Upham C.A. Hyperspectral microwave atmospheric sounding // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2011. V. 49. No. 1. P. 128–142.
5. Borbas E.E., Seemann S.W., Huang H.-L., Li J., Menzel W.P. Global profile training database for satellite regression retrievals with estimates of skin temperature and emissivity // Proc. 14th Intern. ATOVS Study Conf. Beijing, China. CIMSS, University of Wisconsin-Madison, 2005. P. 763–770.
6. Boukabara S.A., Garret K. Benefits of a hyperspectral microwave sensor // IEEE Sensors Proc. 2011. P. 1881–1884.
7. Buehler S.A., Eriksson P., Kuhn T., von Engeln A., Verdes C. ARTS, the atmospheric radiative transfer simulator // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2005. V. 91. P. 65–93.
8. Cardinali C. Monitoring the observation impact on the shortrange forecast // Quarterly J. Royal Meteorological Society. 2009. V. 135. P. 239–250.
9. Chevallier F., Di Michele S., McNally A.P. Diverse profile datasets from the ECMWF 91-level short-range forecasts. NWP SAF Satellite Application Facility for Numerical Weather Prediction. Report NWPSAF-EC-TR-010. 2006. 14 p.
10. Clough S.A., Kneizys F.X., Davis R.W. Line shape and water vapor continuum // Atmospheric Research. 1989. V. 23. P. 229–241.
11. Eriksson P., Buehler S.A., Davis C.P., Emde C., Lemke O. ARTS, the atmospheric radiative transfer simulator, version 2 // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2011. V. 112. No. 10. P. 1551–1558.
12. Lipton A.E. Satellite sounding channel optimization in the microwave spectrum // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2003. V. 41. No. 4. P. 761–781.

13. McClatchey R. A., Fenn R. W., Selby J. E. A., Volz F. E., Garing J. S. Optical properties of the atmosphere. U. S. Air Force Cambridge Research Laboratories report AFCRL-72-0497. 1972. 108 p.
14. Rodgers C. D. Information content and optimization of high spectral resolution measurements / eds. P. B. Hays, J. Wang // Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research II: Proc. SPIE. V. 2830. Bellingham, WA: SPIE, 1996. P. 136–147.
15. Rodgers C. D. Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice. Singapore, L.: World Scientific Publishing, 2000. 253 p.
16. Rothman L. S., Gordon I. E., Babikov Y., Barbe A., Chris Benner D., Bernath P. F., Birk M., Bizzocchi L., Boudon V., Brown L. R., Campargue A., Chance K., Cohen E. A., Coudert L. H., Devi V. M., Drouin B. J., Fayt A., Flaud J.-M., Gamache R. R., Harrison J. J., Hartmann J.-M., Hill C., Hodges J. T., Jacquemart D., Jolly A., Lamouroux J., Le Roy R. J., Li G., Long D. A., Lyulin O. M., Mackie C. J., Massie S. T., Mikhailenko S., Müller H. S. P., Naumenko O. V., Nikitin A. V., Orphal J., Perevalov V., Perrin A., Polovtseva E. R., Richard C., Smith M. A. H., Starikova E., Sung K., Tashkun S., Tennyson J., Toon G. C., Tyuterev V. I., Wagner G. The HITRAN2012 molecular spectroscopic database // J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2013. V. 130. P. 4–50.
17. U. S. Standard Atmosphere. U. S., Washington D. C.: Government Printing Office, 1976. 241 p.

Simulation of satellite microwave radiometric information used to reconstruct three-dimensional fields of atmospheric parameters

V. P. Savorskiy¹, A. B. Akvilonova¹, D. M. Ermakov¹, I. N. Kibardina¹,
O. Yu. Panova¹, M. T. Smirnov¹, S. Y. Turygin², A. P. Chernushich¹

¹ V. A. Kotelnikov Institute of Radioengineering and Electronics RAS,
Fryazino Branch, Fryazino 141190, Russia
E-mail: savor@inbox.ru

² Special Design Bureau of the V. A. Kotelnikov Institute of Radioengineering
and Electronics RAS, Fryazino 141120, Russia
E-mail: tur@sdbireras.ru

The development of tools to enable control of temperature and humidity characteristics of the atmosphere remains one of the most urgent tasks of satellite monitoring of the Earth. One of the most promising areas for the development of these facilities is the use of microwave radiometric satellite surveillance instruments. This is primarily due to the possibilities arising from the creation of microwave radiometric hyperspectrometers that allow recording the continuous high-resolution spectra of microwave radiation from the “atmosphere-underlying surface” system in the range of 10–200 GHz. With this approach, the selection and configuration of the channels of the microwave radiometric system is a critical task, and its solution must be ensured already at the stage of designing and creating microwave radiometric equipment. That is why the successful implementation of development projects of microwave radiometric hyper-spectrometer requires the creation of special simulation software that would enable the researchers to solve the following project tasks: choosing the optimal technical solutions, checking them in the testing process and providing a basis for solving inverse problems in the subsequent thematic analysis of the experimental data. The paper presents a methodology for the development of software for modeling the microwave radiometric measurements of «atmosphere-underlying surface» system radiation, describes software which implements modeling procedures, and shows examples of the usage of these procedures for statistical description of atmosphere profiles.

Keywords: software, radiobrightness temperature, weather forecast, humidity profile, temperature profile

Accepted: 03.04.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-235-250

References

1. Zuyev V. Ye., Komarov V. S., *Statisticheskiye modeli temperatury i gazovykh komponent atmosfery* (Statistical models of temperature and gas components of the atmosphere), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986, 264 p.
2. Aires F., Prigent C., Orlandi E., Milz M., Eriksson P., Crewell S., Lin C.-C., Kangas V., Microwave hyperspectral measurements for temperature and humidity atmospheric profiling from satellite: The clear-sky case, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2015, Vol. 120, pp. 11334–11351.
3. Blackwell W. J., Leslie V. R., Pieper M. L., Samra J. E., All-Weather Hyperspectral Atmospheric Sounding, *Lincoln Laboratory J.*, 2010, Vol. 18, No. 2, pp. 28–47.
4. Blackwell W. J., Bickmeier L. J., Leslie R. V., Pieper M. L., Samra J. E., Surussavadee C., Upham C. A., Hyperspectral microwave atmospheric sounding, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2011, Vol. 49, No. 1, pp. 128–142.
5. Borbas E. E., Seemann S. W., Huang H.-L., Li J., Menzel W. P., Global profile training database for satellite regression retrievals with estimates of skin temperature and emissivity, *Proc. XIV Int. ATOVS Study Conf.*, Beijing, China, CIMSS, University of Wisconsin-Madison, 2005, pp. 763–770.
6. Boukabara S. A., Garret K., Benefits of a hyperspectral microwave sensor, *IEEE Sensors Proceedings*, 2011, pp. 1881–1884.
7. Buehler S. A., Eriksson P., Kuhn T., von Engeln A., Verdes C., ARTS, the atmospheric radiative transfer simulator, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*, 2005, Vol. 91, pp. 65–93.
8. Cardinali C., Monitoring the observation impact on the shortrange forecast, *Quarterly J. Royal Meteorol. Society*, 2009, Vol. 135, pp. 239–250.
9. Chevallier F., Di Michele S., McNally A. P., *Diverse profile datasets from the ECMWF 91-level short-range forecasts. NWP SAF Satellite Application Facility for Numerical Weather Prediction. Report NWPSAF-EC-TR-010*, 2006, 14 p.
10. Clough S. A., Kneizys F. X., Davis R. W., Line shape and water vapor continuum, *Atmos Res.*, 1989, Vol. 23, pp. 229–241.
11. Eriksson P., Buehler S. A., Davis C. P., Emde C., Lemke O., ARTS, the atmospheric radiative transfer simulator, version 2, *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2011, Vol. 112, No. 10, pp. 1551–1558.
12. Lipton A. E., Satellite sounding channel optimization in the microwave spectrum, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2003, Vol. 41, No. 4, pp. 761–781.
13. McClatchey R. A., Fenn R. W., Selby J. E. A., Volz F. E., Garing J. S., *Optical properties of the atmosphere*, Report AFCRL-72-0497, 1972, 108 p.
14. Rodgers C. D., Information content and optimization of high spectral resolution measurements, *Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research II*, In: P. B. Hays, J. Wang (eds.), *Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research II. Proc. SPIE.*, Vol. 2830, Bellingham, WA: SPIE, 1996, pp. 136–147.
15. Rodgers C. D., *Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice*, Singapore, London: World Scientific Publishing, 2000, 253 p.
16. Rothman L. S., Gordon I. E., Babikov Y., Barbe A., Chris Benner D., Bernath P. F., Birk M., Bizzocchi L., Boudon V., Brown L. R., Campargue A., Chance K., Cohen E. A., Coudert L. H., Devi V. M., Drouin B. J., Fayt A., Flaud J.-M., Gamache R. R., Harrison J. J., Hartmann J.-M., Hill C., Hodges J. T., Jacquemart D., Jolly A., Lamouroux J., Le Roy R. J., Li G., Long D. A., Lyulin O. M., Mackie C. J., Massie S. T., Mikhailenko S., Müller H. S. P., Naumenko O. V., Nikitin A. V., Orphal J., Perevalov V., Perrin A., Polovtseva E. R., Richard C., Smith M. A. H., Starikova E., Sung K., Tashkun S., Tennyson J., Toon G. C., Tyuterev V. I., Wagner G., The HITRAN2012 molecular spectroscopic database, *J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2013, Vol. 130, pp. 4–50.
17. *U. S. Standard Atmosphere*, US, Washington D. C.: U. S. Government Printing Office, 1976, 241 p.