

Коррекция искажений спектров радиотеплового излучения атмосферы, получаемых по данным радиометра-спектрометра Р22М при быстро меняющихся гидрометеорологических условиях

Д. М. Ермаков^{1,2}, М. Т. Смирнов^{2,1}

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: dima@ire.rssi.ru*

² *Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники
им. В. А. Котельникова РАН, Фрязино, 141190, Московская обл., Россия
E-mail: smirnov@ire.rssi.ru*

Представлен подход к восстановлению «мгновенных» спектров собственного СВЧ-излучения атмосферы в нестационарных состояниях по данным измерений радиометра Р22М в диапазоне частот 18–27,2 ГГц. Создан алгоритм временной интерполяции измерений, эффективно приводящий данные во всех частотных каналах к единому моменту времени, и предложен критерий качества интерполяции, основанный на сравнении независимо измеренных низко- и высокочастотных ветвей спектра. Проведена обработка выборочных данных сеансов калибровки и наблюдений атмосферы прибором Р22М, показано высокое качество работы предложенного алгоритма. Погрешности коррекции спектров оценены в 0,1–0,3 К, что сравнимо с радиометрической погрешностью измерений в каналах прибора. Тем самым открыта возможность изучения «мгновенных» спектров собственного микроволнового излучения атмосферы в диапазоне 18–27,2 ГГц в сложных, быстро меняющихся гидрометеорологических условиях с высоким спектральным разрешением и удовлетворительной радиометрической точностью.

Ключевые слова: Р22М, СВЧ-спектрометрия атмосферы, интерполяция данных, сложные метеоусловия

Одобрена к печати: 13.02.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-67-75

Введение

Для получения информации о состоянии атмосферы в настоящее время широко используются многочастотные СВЧ-радиометрические (сверхвысокочастотные) измерения (Кутуза и др., 2016; Шарков, 2014). Перспективным направлением для повышения точности восстановления вертикальных профилей температуры и влажности атмосферы представляется применение гиперспектрометров (Саворский и др., 2018; Blackwell et al., 2011). Измерения на многих частотах могут быть получены разными способами. Один из путей — последовательное сканирование по частоте. Время измерения спектра в данном случае получается значительным, и за это время возможно изменение состояния атмосферы. Полученная информация на разных частотах при этом будет соответствовать разным атмосферным состояниям.

Для уточнения экспериментально наблюдаемой связи между радиометрическими данными и параметрами состояния атмосферы требуется приведение измерений к единому моменту времени. Для этого можно использовать информацию, содержащуюся во временных рядах измерений. Такая же проблема возникает при обработке спутниковых данных сканирующих СВЧ-радиометров в задаче построения глобальных полей атмосферных геофизических параметров и восстановления атмосферной динамики (Ермаков и др., 2017). С этой целью применяются интерполяционные методики, учитывающие пространственную связность измерений и предполагающие плавность наблюдаемых изменений во времени (т.е. возможность их удовлетворительно точного описания с помощью аналитических дифференцируемых функций).

Важный частный случай такой задачи возникает при фиксированной геометрии измерений и неизменных координатах точек наблюдения. Так, указанные подходы актуальны при использовании СВЧ-радиометров на геостационарных спутниках. На них планируется применять радиоинтерферометрические методы измерений для повышения пространственного разрешения приборов (Lambriigtsen et al., 2010). При их использовании требуется относительно большое время накопления сигналов для достижения требуемой радиометрической точности измерений. Для восстановления параметров атмосферы в этом случае потребуется аналогичная коррекция данных на основе анализа временных рядов измеряемых последовательно двумерных корреляционных функций входных сигналов.

В настоящей работе рассмотрен ещё один важный частный случай радиометрических наблюдений состояния атмосферы: измерения спектров собственного нисходящего радиотеплового излучения атмосферы в диапазоне частот 18–27,2 ГГц с помощью радиометра-спектрометра P22M. Измерения осуществляются продолжительное время в непрерывном режиме и могут применяться для оперативной диагностики и накопления длинных рядов параметров состояния атмосферы, развития методов интерпретации радиометрических наблюдений, калибровки спутниковых радиометров.

Характеристика данных

Радиометр-спектрометр P22M предназначен для измерения спектра микроволнового излучения в диапазоне частот от 18,0 до 27,2 ГГц со спектральным разрешением 200 МГц (Смирнов и др., 2017). Регистрация сигнала основана на супергетеродинной схеме с программируемым синтезатором частот, что позволяет получать до 47 частотных каналов с шагом 0,2 ГГц внутри указанного частотного диапазона. Измерения проводятся одновременно на двух заданных частотах, разнесённых на 3,2 ГГц. Для регистрации полного спектра необходимо последовательное сканирование на 31-й рабочей частоте гетеродина, что занимает около 11 с. При этом 15 частотных каналов в середине диапазона дублируются, т. е. измерения на частотах 21,2–24,0 ГГц выполняются дважды: в начале и в конце каждого цикла измерений. Рабочий цикл измерений изображён на *рис. 1*.

Цикл измерений начинается одновременно на самой низкой частоте (18 ГГц) низкочастотной ветви (красные линии) и самой низкой частоте (21,2 ГГц) высокочастотной ветви (синие линии). Далее частоты измерений последовательно сдвигаются на 0,2 ГГц с периодичностью, определяемой временем накопления сигнала и временем переходных процессов. После выполнения первых 16 измерений цикла рабочая частота низкочастотной ветви спектра становятся равной 21,2 ГГц и ветви спектра перекрываются. Цикл продолжается, пока рабочая частота высокочастотной ветви спектра не достигнет 27,2 ГГц. В этот момент рабочая частота низкочастотной ветви спектра достигает своего максимума 24,0 ГГц, что определяет спектральный интервал перекрытия двух ветвей: 21,2–24,0 ГГц. На этом цикл измерений заканчивается и начинается новый.

Измерения P22M применяются, в частности, для наблюдения за атмосферой и восстановления вертикальных профилей атмосферной влажности (Аквилонова и др., 2022). Метеорологические условия наблюдений часто таковы, что измерения спектра, выполненные за один рабочий цикл, следует считать существенно несинхронными, т. е. не характеризующими одно и то же состояние атмосферы на всех частотах. Это, в частности, относится к случаю разрывной облачности, быстро движущейся в поле зрения прибора.

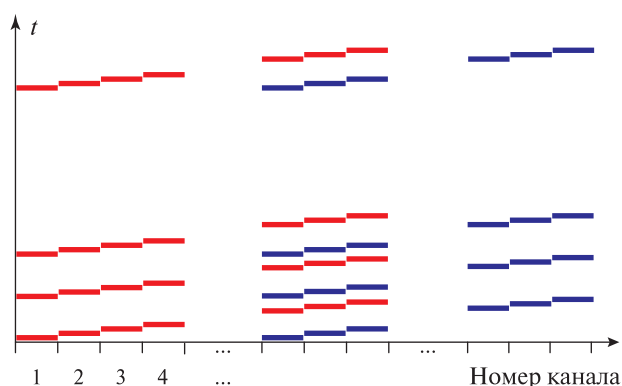


Рис. 1. Циклограмма измерений P22M (см. пояснения в тексте)

Критерием существенной несинхронности выступает взаимный сдвиг низко- и высокочастотной ветвей измеренного спектра (см. примеры на *рис. 3, 4*). В стационарных условиях наблюдений такой сдвиг не обнаруживается. Естественно, такого рода искажения резко снижают точность восстановления атмосферных параметров по наблюдаемым спектрам излучения и, в частности, препятствуют адекватному воспроизведению вертикальных профилей влажности, основанному на вариационных алгоритмах согласования измеренных и модельных спектров. Таким образом, возникает необходимость скорректировать по временным сериям полученных данных спектры собственного радиотеплового излучения атмосферы, которые с удовлетворительной точностью описывали бы одно и то же «мгновенное» состояние атмосферы во всех измерительных каналах. Критерием качества такого восстановления естественно считать сокращение взаимного сдвига низко- и высокочастотной ветвей скорректированного спектра по сравнению с исходным.

Методика обработки

Для расчёта ожидаемых синхронных спектров атмосферного излучения по реально измеренным предложен алгоритм интерполяции данных по времени. Интерполяция происходит независимо в каждом частотном канале. Критерием качества интерполяции принята степень сближения значений двух ветвей спектра в 15 перекрывающихся частотных каналах. Расчёт ожидаемого значения сигнала в i -м канале в некоторый интересующий момент времени t_0 в пределах текущего рабочего цикла использует реально измеренные значения в канале в момент времени t_i этого рабочего цикла, а также значения, полученные в предыдущем, $t_i - T$, и следующем, $t_i + T$, циклах измерений, где T — период цикла измерений.

Алгоритм интерполяции предполагает плавное изменение сигнала, регистрируемого в трёх последовательных циклах измерений (т. е. за время $2T$ порядка 22 с). Использование трёх последовательных значений позволяет в первом (квадратичном) приближении учесть нелинейность изменения сигнала. В качестве момента времени t_0 , к которому приводили измерения во всех каналах, было выбрано время начала очередного рабочего цикла. Таким образом, начальные измерения каждого цикла не проходили процедуру интерполяции, а для измерений в остальных каналах было выполнено условие:

$$t_i - T < t_0 < t_i < t_i + T. \quad (1)$$

Для упрощения дальнейших выражений введена замена, сдвигающая начало отсчёта времени к моменту реального измерения в i -м канале в текущем рабочем цикле: $x = t - t_i$. В новых обозначениях моменты времени измерений равны, соответственно, $x_i - T = -T$, $x_i = 0$ и $x_i + T = T$, а момент начала текущего цикла $x_0 = t_0 - t_i$. В предположении, что изменения сигнала в i -м канале в интервале $2T$ хорошо описываются квадратичной зависимостью $s_i(x) = a_i x^2 + b_i x + c_i$, значение $s_i(x_0)$ легко найти по известным значениям $s_i(0)$, $s_i(\pm T)$, выполнив следующую последовательность вычислений:

$$a_i = \frac{s_i(T) - 2s_i(0) + s_i(-T)}{2T^2}, \quad (2)$$

$$b_i = \frac{s_i(T) - s_i(-T)}{2T}, \quad (3)$$

$$c_i = s_i(0), \quad (4)$$

$$s_i(x_0) = a_i x_0^2 + b_i x_0 + c_i. \quad (5)$$

Моменты времени начала каждого цикла t_0 фиксируются в файле данных. Моменты времени измерения в i -м канале, независимо для высокочастотной и низкочастотной частей спектра, в текущем рабочем цикле рассчитываются из соотношения $t_i = t_0 + iT/31$.

Для крайних циклов интервала алгоритм необходимо откорректировать, так как в этом случае нет предыдущего цикла $t_1 - T$ или следующего $t_1 + T$ (см. выражение (1)). В этих случаях применяется экстраполяция квадратичной зависимости, полученной по трём крайним рабочим циклам, в область меньших (больших) значений времени. Фактически соотношения (2)–(5) остаются прежними, но в соотношениях (1) t_0 становится минимальной (максимальной) величиной.

Обсуждение результатов

Ниже обсуждены результаты применения алгоритма интерполяции к спектрам, полученным в процессе калибровки прибора по охлаждаемому чёрному телу с контролируемой термодинамической температурой, а также при наблюдениях атмосферы в существенно нестационарных гидрометеорологических условиях.

На *рис. 2* приведены примеры данных, полученных в ходе калибровки прибора. *Рисунок 2а* визуализирует большой фрагмент сеанса калибровки в развёртке по времени и частотным каналам: каждое вертикальное сечение цветного прямоугольника соответствует одному циклу измерения спектра, цвет кодирует величину яркостной температуры, измеренной в каждом из частотных каналов (рабочая частота увеличивается в направлении сверху вниз от 18 до 27,2 ГГц, цветовая шкала яркостной температуры в градусах Кельвина приведена ниже). Калибровочное чёрное тело охлаждалось примерно до температуры жидкого азота (оранжевая область на прямоугольнике), а затем снова нагревалась. Стрелки с номерами 1 и 2 над цветным полем индицируют несколько последовательных циклов измерений спектров, проиллюстрированных графиками на нижних панелях рисунка.

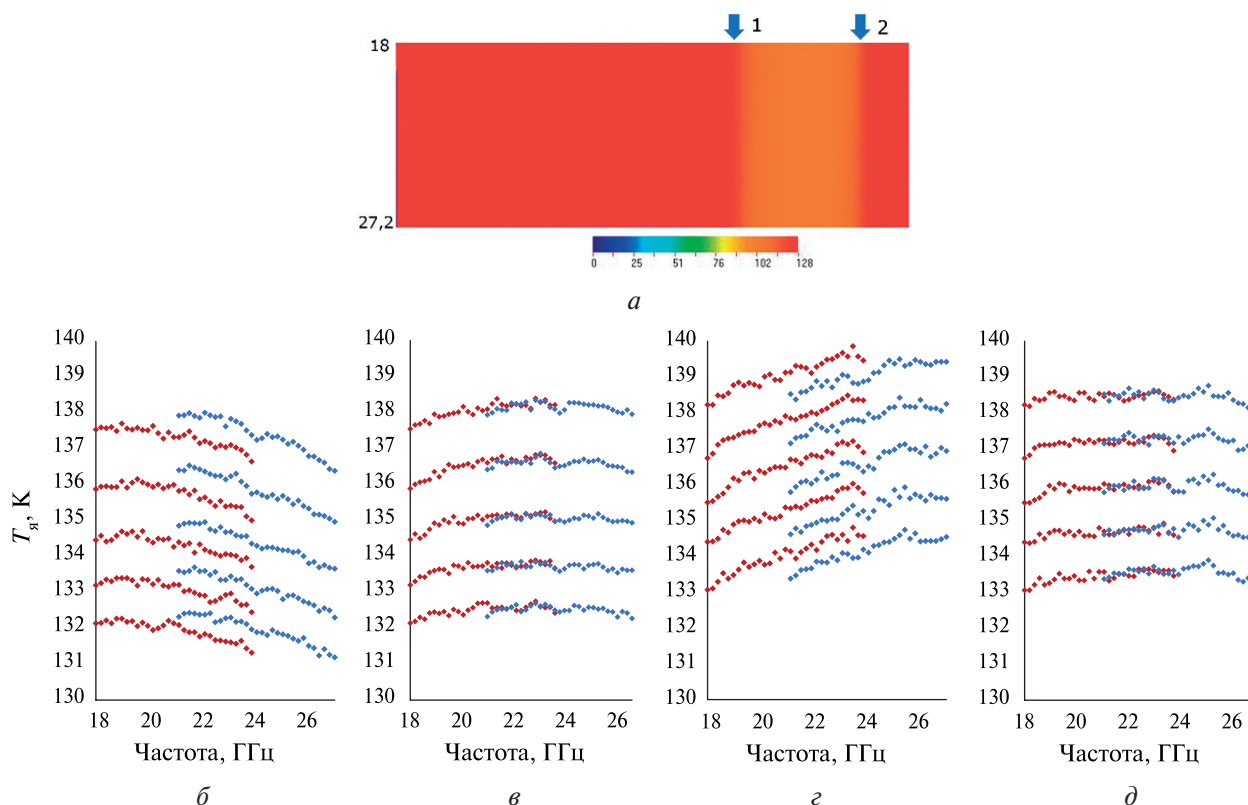


Рис. 2. Корректировка спектра в сеансе калибровки (см. пояснения в тексте)

Спектры, показанные на *рис. 2б*, соответствуют процессу остывания чёрного тела (наклон вниз графиков спектров, полученных в момент времени, соответствующий стрелке 1 на

рис. 2а). Средняя скорость изменения яркостной температуры в каждом из каналов, оценённая по измерениям в последовательных циклах, составила около минус 0,11 К/с. Чётко видны расхождения между соответствующими низко- и высокочастотными ветвями спектров, полученных в каждом цикле измерений (красные и синие точки соответственно). Среднее расхождение между ними составило 0,52 К. Аналогично графики рис. 2г иллюстрируют процесс нагревания чёрного тела (стрелка 2). Средняя скорость изменения яркостной температуры в каналах прибора составила около 0,09 К/с, а расхождения между ветвями спектров — 0,47 К. Рисунки 2в и д иллюстрируют результат корректировки измеренных спектров, показанных на рис. 2б и г соответственно. При той же средней скорости измерений яркостной температуры в каналах прибора расхождения между ветвями сократились до 0,06 К (см. рис. 2в) и 0,01 К (см. рис. 2д), а наклон спектров выровнялся.

Рисунки 3, 4 (см. с. 72) иллюстрируют сеансы наблюдений атмосферы 11 июня и 29 августа 2021 г. в меняющихся гидрометеорологических условиях. Способ визуализации данных аналогичен принятому на рис. 2. В обоих случаях наблюдается ярко выраженный пик на частоте резонансного поглощения водяным паром (22,4 ГГц, в центре рабочего спектрального диапазона). Он выражается в виде максимума на графиках нижних панелей рис. 3, 4 и широкой горизонтальной полосы красных тонов по центру цветного прямоугольника на верхних панелях. В обоих случаях стрелка на верхних панелях, как и ранее на рис. 2, индицирует выбранные для коррекции спектры.

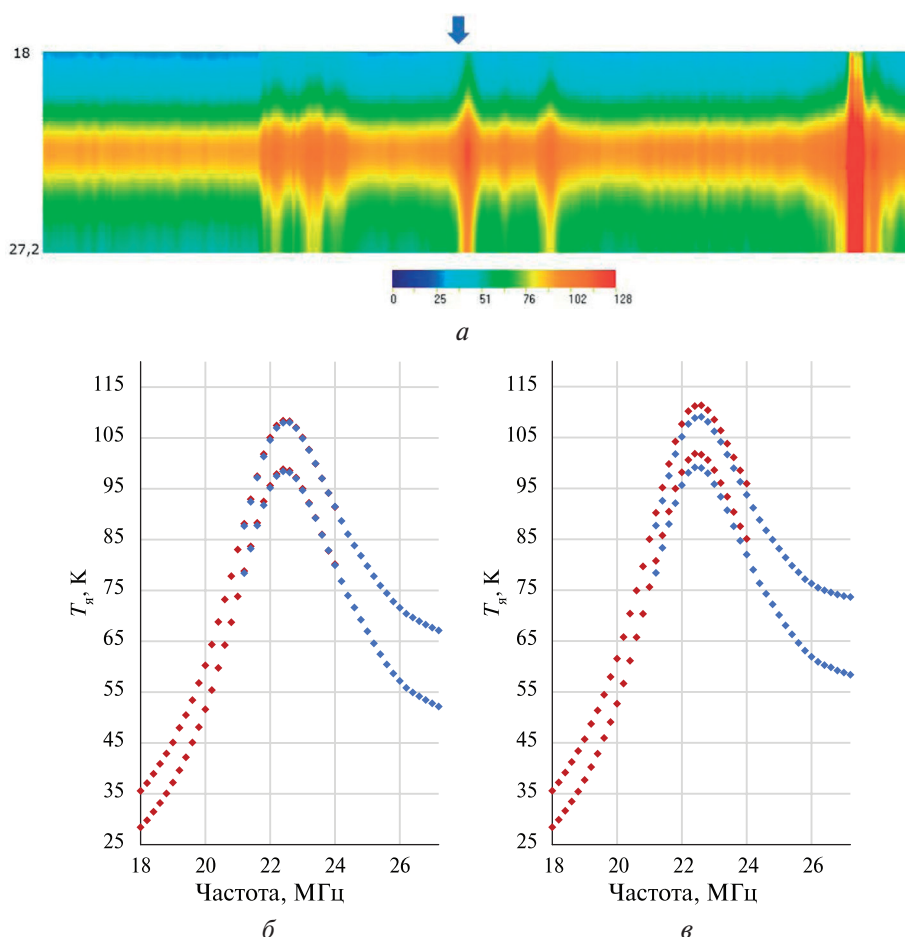


Рис. 3. Сеанс атмосферных измерений 11 июня 2021 г. (см. пояснения в тексте)

Смена гидрометеорологических условий хорошо прослеживается на верхних панелях рис. 3, 4: при регистрации облачности наблюдается возрастание яркостной температуры, особенно в высокочастотной части спектра (внизу прямоугольника), и общее уширение спектров

(расширение горизонтальной красной полосы). Как видно, данные, отобранные для обработки, в обоих примерах соответствуют моменту быстрого перехода от безоблачного состояния к облачному. Средняя скорость изменения яркостной температуры в каналах прибора составляла 0,13 и 0,24 К/с для случаев *рис. 3, 4* соответственно. При этом среднее расхождение между низко- и высокочастотными ветвями измеренных спектров было равно соответственно 0,89 К (см. *рис. 3б*) и 1,83 К (см. *рис. 4б*).

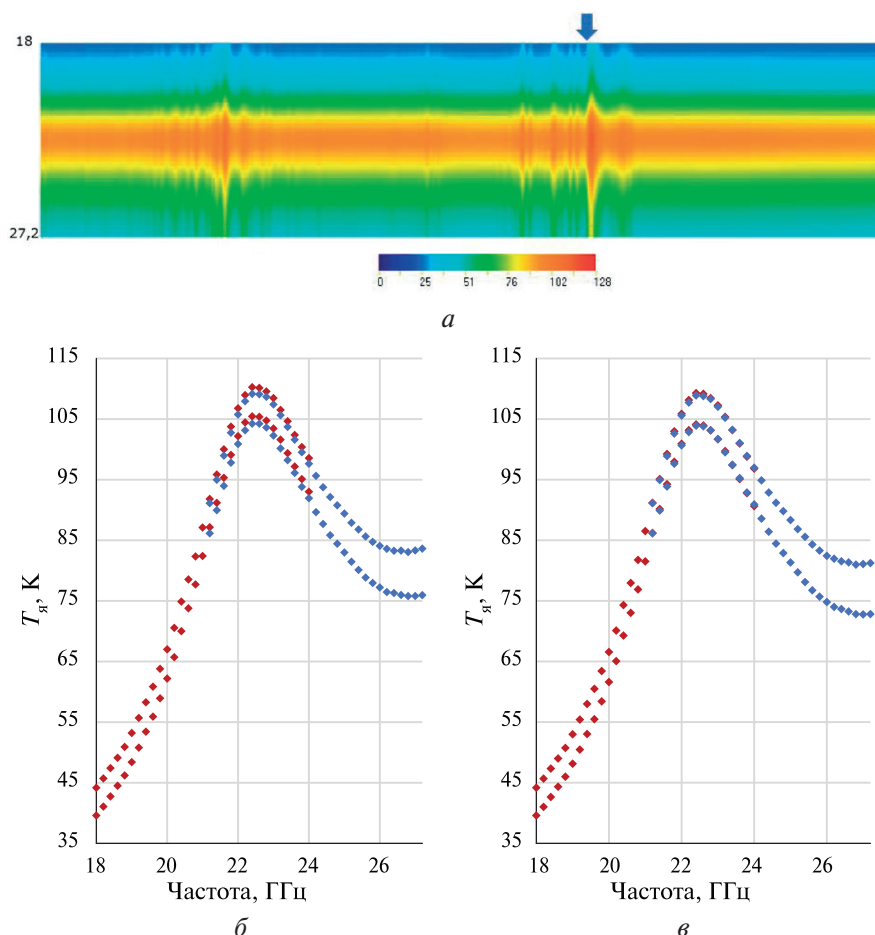


Рис. 4. Сеанс атмосферных измерений 29 августа 2021 г. (см. пояснения в тексте)

Результаты коррекции спектров иллюстрируют *рис. 3в, 4в*. Видно, что, как и в случае сеанса калибровки, низко- и высокочастотные ветви спектров хорошо сходятся между собой. Среднее расхождение после коррекции составило 0,08 и 0,32 К соответственно.

Все результаты тестирования алгоритма коррекции спектров обобщены в *таблице*.

Результаты тестирования алгоритма коррекции спектров

Сеанс	K1	K2	A1	A2
dT/dt , К/с	-0,11	0,09	0,13	0,24
ΔT , К	0,52	0,47	0,89	1,83
$\Delta T'$, К	0,06	0,01	0,08	0,32

Примечание: K1, K2, A1, A2 — рассмотренные случаи сеанса калибровки и атмосферных наблюдений соответственно; dT/dt — средняя скорость изменения яркостной температуры в каналах прибора; ΔT , $\Delta T'$ — среднее расхождение между низко- и высокочастотными ветвями измеренных спектров до и после коррекции соответственно.

Как видно, во всех случаях алгоритм коррекции уменьшает расхождения между низко- и высокочастотными ветвями измеренных спектров примерно на порядок.

Заключение

В работе предложен подход к восстановлению «мгновенных» спектров собственного СВЧ-излучения атмосферы в нестационарных состояниях по данным измерений радиометра Р22М в диапазоне частот 18–27,2 ГГц. Подход основан на алгоритме временной интерполяции измерений, эффективно приводящем данные цикла измерений во всех частотных каналах к единому моменту времени, и критерии качества интерполяции, основанном на сравнении независимо измеренных низко- и высокочастотных ветвей спектра. На примерах обработки данных сеансов калибровки и наблюдений атмосферы показано высокое качество работы предложенного алгоритма. Остаточные средние невязки между двумя ветвями спектра сопоставимы с погрешностью измерений в отдельных каналах (около 0,1–0,3 К). Тем самым открыта возможность изучения «мгновенных» спектров собственного микроволнового излучения атмосферы в диапазоне 18–27,2 ГГц в сложных, быстро меняющихся гидрометеорологических условиях с высоким спектральным разрешением и удовлетворительной радиометрической погрешностью.

Работа выполнена в рамках государственных заданий Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН (в части осуществления длительных атмосферных измерений) и Института космических исследований РАН (в части разработки интерполяционной методики обработки, тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8).

Литература

1. *Аквилонова А. Б., Егоров Д. П., Кутуза Б. Г., Смирнов М. Т.* Изучение характеристик облачной атмосферы по результатам измерений спектров ее нисходящего СВЧ-излучения в области резонансного поглощения водяного пара 18,0–27,2 ГГц // *Метеорология и гидрология*. 2022. № 12. С. 66–77. DOI: 10.52002/0130-2906-2022-12-66-77.
2. *Ермаков Д. М., Шарков Е. А., Чернушич А. П.* Циркуляция скрытого тепла в атмосфере Земли: анализ 15 лет радиотепловых спутниковых измерений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2017. Т. 14. № 6. С. 9–27. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-9-27.
3. *Кутуза Б. Г., Данилычев М. В., Яковлев О. И.* Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. М.: ЛЕНАНАД, 2016. 336 с.
4. *Саворский В. П., Аквилонова А. Б., Ермаков Д. М., Кибардина И. Н., Панова О. Ю., Смирнов М. Т., Турыгин С. Ю., Чернушич А. П.* Моделирование спутниковой СВЧ-радиометрической информации, используемой для восстановления трёхмерных полей атмосферных параметров // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. Т. 15. № 2. С. 235–250. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-235-250.
5. *Смирнов В. М., Саворский В. П., Маречек С. В., Турыгин С. Ю.* Спектральные измерения нисходящего радиотеплового излучения атмосферы в диапазоне 18–27 ГГц // *Материалы Всероссийской науч. конф. «7-е Всероссийские Армандовские чтения. Современные проблемы дистанц. зондирования, радиолокации, распространения и дифракции радиоволн»*. Муром, 27–29 июня 2017. Муром: Изд. полиграф. центр МИ ВлГУ, 2017. С. 175–179.
6. *Шарков Е. А.* Радиотепловое дистанционное зондирование Земли: физические основы. В 2 т. Т. 1. М.: ИКИ РАН, 2014. 544 с.
7. *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. DOI: 10.1109/TGRS.2010.2052260.
8. *Lambrigtsen B., Brown S. T., Gaier T. C., Herrell L., Kangaslahti P. P., Tanner A. B.* Monitoring the hydrologic cycle with the PATH mission // *Proc. IEEE*. 2010. V. 98. No. 5. P. 862–877. DOI: 10.1109/JPROC.2009.2031444.

Correction of distortions of the spectra of thermal radiation of the atmosphere obtained from the data of the R22M radiometer-spectrometer under rapidly changing hydrometeorological conditions

D. M. Ermakov^{1,2}, M. T. Smirnov^{2,1}

¹ *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: dima@ire.rssi.ru

² *Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Fryazino Branch*
Fryazino 141190, Moscow Region, Russia
E-mail: smirnov@ire.rssi.ru

An approach is presented for reconstructing the “instantaneous” spectra of the atmosphere’s own microwave radiation in non-stationary states based on the measurements of the R22M radiometer in the frequency range of 18–27.2 GHz. An algorithm for temporal interpolation of measurements has been developed that effectively brings data in all frequency channels to a single point in time, and a criterion for the quality of interpolation based on a comparison of independently measured low- and high-frequency branches of the spectrum has been proposed. The processing of sample data from calibration sessions and observations of the atmosphere with the R22M instrument was carried out, and a high quality of the proposed algorithm was shown. Spectra correction errors are estimated at 0.1–0.3 K, which is comparable with the radiometric measurement error in the instrument channels. Thus, the possibility of studying the “instantaneous” spectra of natural microwave radiation of the atmosphere in the range of 18–27.2 GHz in complex, rapidly changing hydrometeorological conditions with high spectral resolution and satisfactory radiometric accuracy has been opened.

Keywords: R22M, atmospheric microwave spectrometry, data interpolation, complex weather conditions

Accepted: 13.02.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-67-75

References

1. Akvilonova A. B., Egorov D. P., Kutuza B. G., Smirnov M. T., Study of the characteristics of the cloud atmosphere based on the results of measurements of the spectra of its descending microwave radiation in the region of resonant absorption of water vapor 18.0–27.2 GHz, *Meteorologiya i gidrologiya*, 2022, No. 12, pp. 66–77 (in Russian), DOI: 10.52002/0130-2906-2022-12-66-77.
2. Ermakov D. M., Sharkov E. A., Chernushich A. P., Circulation of latent heat in the earth’s atmosphere: an analysis of 15-year radiothermal satellite measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 9–27 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-9-27.
3. Kutuza B. G., Danilychev M. V., Yakovlev O. I., *Sputnikovyi monitoring Zemli: Mikrovolnovaya radiometriya atmosfery i poverkhnosti* (Satellite monitoring of the Earth: Microwave radiometry of the atmosphere and surface), Moscow: LENAND, 2016, 336 p. (in Russian).
4. Savorskiy V. P., Akvilonova A. B., Ermakov D. M., Kibardina I. N., Panova O. Yu., Smirnov M. T., Turygin S. Yu., Chernushich A. P., Simulation of satellite microwave radiometric information used to restore three-dimensional fields of atmospheric parameters, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 2, pp. 235–250 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-2-235-250.
5. Smirnov V. M., Savorskiy V. P., Marechek S. V., Turygin S. Yu., Spektral’nye izmereniya niskhodyashchego radioteploвого izlucheniya atmosfery v diapazone 18–27 GGt (Spectral measurements of descending radiothermal radiation of the atmosphere in the range of 18–27 GHz), *Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii “7-e Vserossiiskie Armandovskie chteniya. Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya, radiolokatsii, rasprostraneniya i difraktsii radiovoln”* (Materials of the All-Russia Science Conf. “7th All-Russian Armand Readings. Modern Problems of Remote Sensing, Radar, Propagation and Diffraction of Radio Waves”), Murom, 27–29 June 2017, Murom: Izd. Polygraphicheskii tsentr MI VIGU, 2017, pp. 175–179 (in Russian).

6. Sharkov E. A., *Radioteplovoe distantsionnoe zondirovanie Zemli: fizicheskie osnovy* (Radiothermal remote sensing of the Earth: physical foundations), Moscow: IKI, 2014, Vol. 1, 544 p. (in Russian).
7. 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, Vol. 49, No. 1, pp. 128–142, DOI: 10.1109/TGRS.2010.2052260.
8. Lambriksen B., Brown S.T., Gaier T.C., Herrell L., Kangaslahti P.P., Tanner A.B., Monitoring the hydrologic cycle with the PATH mission, *Proc. IEEE*, 2010, Vol. 98, No. 5, pp. 862–877, DOI: 10.1109/JPROC.2009.2031444.