# МНОГОЧАСТОТНОЕ Свч-радиометрическое

# зондирование атмосферы вблизи спектральной линии водяного пара 18-27 ГГц

Егоров Д.П.1, Кутуза Б.Г.1, Смирнов М.Т.2

1 Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Москва

[dobrix95@gmail.com](mailto:dobrix95@gmail.com), kutuza@cplire.ru

2 Фрязинский филиал института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино

smirnov@sunclass.ire.rssi.ru

Представлена методика и результаты обработки непрерывных многочастотных измерений нисходящего излучения атмосферы вблизи спектральной линии поглощения водяного пара 22.235 ± 4 ГГц. Измерения проводились с наземного пункта наблюдений, расположенного в г.Фрязино Московской области. Рассмотрен двухчастотный метод определения полной массы водяного пара Q и водозапаса облаков W. Предложен многочастотный метод их определения. Приведены результаты расчётов значений Q и W по данным проведенных измерений.

Введение

Специальный пункт наземных СВЧ-радиометрических наблюдений атмосферы был создан на территории Фрязинского филиала Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН. Измерения излучения атмосферы производились из окна лаборатории при помощи СВЧ радиометра спектрометра Р22М, разработанного в СКБ ИРЭ под руководством С.Ю. Турыгина [4]. Данный прибор позволяет измерять спектры радиотеплового излучения в диапазоне 18-27.2 ГГц с частотным разрешением 0.2 ГГц. Спектр излучения получается путем сканирования по частоте, типичное время получения полного спектра составляет ~11 сек. Измерения проводились круглосуточно. Для метеорологической интерпретации СВЧ-радиометрических измерений регулярно используется дополнительная информация. К ней относятся результаты метеонаблюдений с двух расположенных на расстоянии порядка 300 метров метеостанций Vantage Pro2 и фото фиксация условий наблюдений при помощи 2.0 мегапиксельной видеокамеры HI3516C. Метеостанции измеряют температуру и относительную влажность воздуха, атмосферное давление, скорость и направление ветра, интенсивность и сумму осадков. Данные с метеостанций с интервалом в 1 мин. передаются на сервер и записываются в базу данных. Дальнейшая обработка данных измерительных сеансов осуществляется при помощи программного обеспечения, разработанного на языках C++ и Python. Программное обеспечение реализует ниже описанную методику калибровки измерений и алгоритмы определения интегральных параметров и – полной массы водяного пара и водозапаса облаков.

Методика определения полной массы водяного пара и водозапаса облаков

Для определения полной массы водяного пара и водозапаса облаков существенное значение имеет качественная калибровка СВЧ-радиометрических измерений. В данной работе использовалась внешняя калибровка по яркостным температурам абсолютно черного тела и безоблачной атмосферы следующим образом:

Здесь – истинная яркостная температура в момент времени , – яркостная температура абсолютно черного тела (принята за 290 K), – модельное значение яркостной температуры безоблачной атмосферы при известных в момент времени метеорологических условиях (температура, давление, влажность), и – показания радиометра в моменты времени и соответственно.

Модельные значения яркостных температур расчитываются в соответствии с моделью атмосферного поглощения Rec.ITU-R P.676-3 (МСЭ) [2] (она используется и в дальнейших расчетах), содержащей теоретико-эмпирические зависимости погонных коэффициентов поглощения в кислороде и водяном паре ( и (дБ/км)) от частоты ν (или длины волны λ), температуры воздуха , атмосферного давления и абсолютной влажности . Эти зависимости для условий стандартной атмосферы (, мм.рт.ст., г/м3) отображены на Рис. 1.

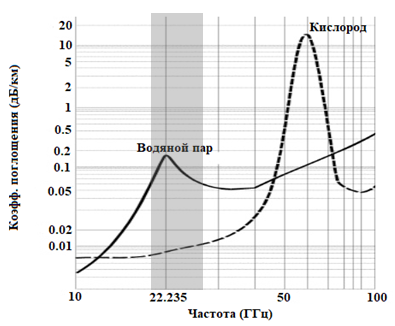


Рис. 1. Зависимость погонного коэффициента поглощения от частоты

(для стандартной атмосферы)

Полное поглощение (в зените) оценивается моделью [1, 2] как:

где – значения температуры, давления и влажности, измеренные у поверхности Земли; и – характеристические высоты, причем (км), а = 1.8 (2.1) (км) в обычных условиях (при дожде).

С учетом соображений (нп), можно считать, что [1]:

где , – поправка на неизотермичность, θ – зенитный угол наблюдения.

Метод определения полной массы водяного пара и водозапаса облаков при двухчастотном измерении микроволнового излучения атмосферы заключается в численном решении следующей системы уравнений [1]:

Здесь

– поглощение в кислороде;

где

– поглощение в водяном паре,

а

где – температура облака ( для модельных расчетов),

, , .

Если известна яркостная температура , измеренная под определенным зенитным углом θ, то полное поглощение (в зените) можно выразить (из (3)) как:

Ошибки определения и связанные с ошибками измерения яркостной температуры и определения вычисляются с помощью формул [3]:

где , тогда как – для ошибки определения и в 1 К и 2 К соответственно.

Многочастотный ( каналов) метод определения и заключается в решении следующей задачи минимизации:

Результаты обработки измерений

Ниже представлены результаты расчетов значений и по данным некоторых измерительных сеансов с помощью двухчастотного метода. (Здесь θ = 51 градус – угол наблюдения). На Рис. 2 изображены временной ход яркостных температур (2-а) и значения и (2-б и 2-в соответственно) по данным сеанса от 02 августа 2017 г. (слабая облачность / безоблачная атмосфера; температура воздуха , атмосферное давление мм.рт.ст., абсолютная влажность г/м3, ). Для расчетов выбраны следующие пары частот: 18 и 21, 18 и 22, 21 и 27, 22 и 27 ГГц.

На Рис. 3 – (3-а), (3-б), (3-в) по данным сеанса от 01 августа 2017 г. (безоблачная погода сменяется развитой облачностью) температура воздуха , атмосферное давление мм.рт.ст., абсолютная влажность г/м3, ).

На Рис. 4-а и 4-б представлены значения и , вычисленные по данным тех же сеансов с помощью многочастотного метода. При расчетах на основе многочастотного метода использовались данные, полученные на каналах 18, 21, 22 и 27 ГГц.

|  |  |
| --- | --- |
| Tb02082017.png  2-а | Tb02082017.png  3-а |
| λ1 = 1.67 см, λ2 = 1.35 см, λ3 = 1.11 см  **Двухчастотный метод** | |
| Tb02082017.png  2-б | Tb02082017.png  3-б |
| Tb02082017.png  2-в | Tb02082017.png  3-в |
| Рис. 2. Сеанс от 02 августа 2017г.  2-а) яркостные температуры (К);  2-б) полная масса водяного пара (г/см2);  2-в) водозапас облаков (кг/м2). | Рис. 3. Сеанс от 01 августа 2017г.  3-а) яркостные температуры (К);  3-б) полная масса водяного пара (г/см2);  3-в) водозапас облаков (кг/м2). |
| **Многочастотный метод** | |
| qwopt18092017.png | qwopt02082017.png |
| а) | б) |
| Рис. 4. (г/см2) и (кг/м2) ( а) сеанс от 02 августа 2017г., б) сеанс от 01 августа 2017г.) | |

Заключение

Цифровая обработка данных измерений показывает, что при использовании двухчастотного метода определения полной массы водяного пара и водозапаса облаков различным парам частот соответствуют в целом близкие значения и . Точность расчетов минимальна, если для выбранной пары частот определитель системы (4) принимает близкие к нулю значения:

Так, например, при : , , , , а (частоты указаны в ГГц). Выбор пары частот 18 и 27 ГГц приводит к неудовлетворительным результатам (разброс по Q – до 8.3 г/см2, по W – до 5.3 км/м2 в условиях развитой облачности), тогда как для остальных указанных пар частот сильного разброса значений и не наблюдается.

Полученные с помощью многочастотного метода значения и достаточно хорошо соответствуют значениям, рассчитанным двухчастотным методом. Сравнительный анализ точности обоих методов планируется провести в дальнейших исследованиях. В завершение необходимо отметить, что на точности определения полной массы водяного пара и водозапаса облаков, вне зависимости от выбранного метода, сказываются также и ошибки используемой модели спектра поглощения атмосферных газов.

ЛИТЕРАТУРА

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

2. Rec. ITU-R P.676-3. Attenuation by atmospheric gases // The ITU Radiocommunication, 1997 г.

3. Р.А. Казарян, Б.Г. Кутуза. О точности определения полной массы водяного пара и водозапаса облаков при двухчастотном измерении микроволнового излучения атмосферы // ИРЭ РАН, 2014 г.

4. Данилычев М.В., Казарян Р.А., Калинкевич А.А., Кутуза Б.Г., Турыгин С.Ю. – Наземный СВЧ радиометр для исследования атмосферы и обеспечения подспутниковых экспериментов //Акустооптические и радиолокационные методы измерений и обработки информации: Материалы 9-ой Международной научно-технической конференции /НТОРЭС им. А.С. Попова, Суздаль, Россия, 2016 г., c.203-207.

5. Башаринов А.Е., Кутуза Б.Г. Исследования радиоизлучения и поглощения облачной атмосферы в миллиметровом и сантиметровом диапазонах // Тр. Главн. геоф. обсерв., вып. 222, стр. 100-110, Л., 1968 г.

6. Аквилонова А.Б., Кутуза Б.Г. Радиотепловое излучение облаков // Радиотехника и электроника, т. 23, № 9, стр. 1792-1806, 1978.