

## **СВЧ радиометрические комплексы для восстановления температурно-влажностных профилей атмосферы с высоким пространственным разрешением**

В.П.Саворский<sup>1</sup>, И.Н.Кибардина<sup>1</sup>, С.Ю. Турыгин<sup>2</sup>, М.Т.Смирнов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФирЭ им. В.А. Комельникова РАН, savor@ire.rssi.ru,

<sup>2</sup>СКБ ИРЭ РАН, tur@sdbireras.ru

*Проанализированы возможности использования спутниковых СВЧ радиометрических гиперспектральных зондировщиков для восстановления температурно-влажностных профилей атмосферы с пространственным разрешением порядка 1÷3 км в нижней тропосфере-*

*This paper analyzes the possibility of using satellite microwave radiometric hyperspectral sounders to restore temperature and humidity profiles of the atmosphere with the spatial resolution of about 1-3 km in the lower troposphere.*

Температура и влажность атмосферы являются ключевыми параметрами для определения состояния атмосферы, поскольку при исследовании процессов, происходящих в атмосфере, важно знание высотных профилей температуры и влажности атмосферы, особенно в нижних ее слоях. Наибольший интерес представляет информация о слоях атмосферы до высот 5 км от поверхности Земли. Использование данных спутникового СВЧ радиофизического зондирования атмосферы позволяет получать и анализировать эту информацию в непрерывном режиме и охватить, практически, всю поверхность Земли. Важно отметить, что, не смотря на существенный прогресс за последние 20 лет в развитии СВЧ средств наблюдения, остается нерешенным целый ряд проблем. К ним, прежде всего, относятся вопросы пространственного разрешения СВЧ радиометрических средств спутниковых наблюдений, без решения которых невозможно существенным образом увеличить область применения спутниковых средств СВЧ радиометрического мониторинга атмосферы и поверхности Земли.

В настоящее время для задач различных прогнозов, необходимо обеспечить пространственное разрешение температурно-влажностных профилей как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях порядка 1÷3 км в слое 0,5÷5 км от поверхности Земли. Важно при этом обеспечить наблюдение вариаций температуры и влагосодержания (в среднем по слою 1 км) с точностью не хуже 7К и 3,4%, соответственно, что дает возможность исследования вариаций указанных параметров атмосферы в летних условиях умеренной климатической зоны Земли [1].

Для решения задачи восстановления температурно-влажностных профилей нижней тропосферы с требуемым пространственным разрешением, в работе были проанализированы возможности спутниковых СВЧ радиометрических гиперспектральных зондировщиков. Создание данного класса приборов стала возможной благодаря созданию широкополосных (более 1 Гбит/с) систем передачи данных, развитию СВЧ электроники и достижениям в космическом приборостроении. Это, в конечном итоге, привело к миниатюризации приемников СВЧ диапазона с низким энергопотреблением и малыми шумами на частотах вплоть до 200 ГГц.

Исходя из требуемого горизонтального разрешения  $\Delta L$ , можно оценить необходимый размер апертуры антенной системы  $D$ . Горизонтальное разрешение  $\Delta L$  при зондировании в надир определяется шириной диаграммы направленности  $\theta$  и высотой  $H$ , с которой проведены наблюдения. При малых размерах диаграммы направленности  $\theta \ll 1$  для горизонтального разрешения  $\Delta L$  с высокой точностью

верно приближение  $\Delta L = \theta H$  и  $\Delta L = \lambda H / \sqrt{\varepsilon} D$ , где  $\lambda$  - длина волны,  $\varepsilon$  - коэффициент использования антенны. Так как  $0,5 < \varepsilon < 0,9$ , то размер антенны должен быть в пределах

$$\frac{150}{f[\text{ГГц}]\Delta L[\text{км}]} < D[\text{м}] < \frac{212}{f[\text{ГГц}]\Delta L[\text{км}]}, \quad (1)$$

Технические требования к предельной чувствительности СВЧ радиометрической системы  $\sigma_{T_a}^{(q)}(f)$  для использования в целях восстановления профилей водяного пара можно определить, исходя из следующего соотношения

$$\sigma_{T_a}^{(q)}(f) = \sigma_q(h) \frac{\partial T_a(f)}{\partial q(h)} = 1,6 \cdot 10^{-3} \sigma_q(h) \frac{\partial T_a(f)}{\partial s(h)}, \quad (2)$$

где  $\sigma_q(h)$  – среднеквадратические вариации массовой доли водяного пара на высоте  $h$  (см. [1]),

$\partial T_a(f) / \partial q(h)$  - значение весовой функции радиоярких температур при наблюдении в надир системы «атмосфера - подстилающая поверхность» из космоса в зависимости от вариаций массовой доли водяного пара на высоте  $h$ ,

$\partial T_a(f) / \partial s(h)$  - значение весовой функции радиоярких температур при наблюдении в надир системы «атмосфера - подстилающая поверхность» из космоса в зависимости от вариаций объемного отношения смеси водяного пара на высоте  $h$ .

Аналогично технические требования к предельной чувствительности СВЧ радиометрической системы  $\sigma_{T_a}^{(T)}(f)$  для использования в целях восстановления профилей термодинамической температуры можно определить, исходя из следующего соотношения

$$\sigma_{T_a}^{(T)}(f) = \sigma_T(h) \frac{\partial T_a(f)}{\partial T(h)}, \quad (3)$$

где  $\sigma_T(h)$  – среднеквадратические вариации термодинамической температуры атмосферы на высоте  $h$  (см. [1]),

$\partial T_a(f) / \partial T(h)$  - значение весовой функции радиоярких температур при наблюдении в надир системы «атмосфера - подстилающая поверхность» из космоса в зависимости от вариаций термодинамической температуры атмосферы на высоте  $h$ .

В рамках работы были проведены расчеты спектральных зависимостей весовых функций радиоярких температур, измеренных в надир с космических носителей, в СВЧ диапазоне 15÷200 ГГц для летних зональных условий среднеширотной атмосферы при наблюдениях над сушей ( $\kappa=0,9$ ) и водной поверхностью ( $\kappa=0,5$ ),  $\kappa$  – коэффициент излучения. Расчеты выполнены с помощью программного пакета ARTS (Atmospheric Radiative Transfer System) [2,3]. Пакет ARTS позволяет вычислять коэффициент поглощения вдоль трассы, значения наблюдаемых для данного состояния атмосферы радиоярких температур и, что существенно для задач данного исследования, значения весовых функций термодинамических температур и влагосодержания для слоя атмосферы заданной толщины в зависимости от высоты.

Для расчета излучения, регистрируемого прибором, численно решается прямая задача переноса излучения. В численной модели трасса вдоль линии зрения разбивается на отрезки, где температура постоянна. Процедура вычисления состоит из следующих этапов:

- вычисление коэффициентов поглощения на заданной сетке;
- определение линии зрения;
- вычисление функций источника и коэффициентов передачи вдоль линии зрения;
- итерационное решение уравнения переноса излучения;
- вычисление весовых функций.

Модель передачи атмосферного излучения использует ограниченное число параметров. Решение прямой задачи вычисления интенсивности излучения (или яркостной температуры), применяемое на практике, реально состоит либо в использовании эмпирически определенных соотношений, либо численным моделированием физических соотношений, необходимых для описания передачи излучения. Модель, используемая в ARTS, в основном представляет собой численное моделирование процесса излучения, но некоторые части основаны на эмпирических исследованиях, такие как, например, параметризация модели переноса излучения вне линий поглощения.

Пакет ARTS позволяет вычислять коэффициент поглощения вдоль трассы с учетом состава атмосферы и, далее, интенсивность излучения в точке расположения измерительного прибора, как в абсолютных величинах, так и в виде яркостной температуры, используя соотношение Планка. Пакет ARTS позволяет вычислять также весовые функции.

Весовая функция – это частная производная интенсивности излучения по некоторой переменной, используемой в модели излучения, которая характеризует чувствительность интенсивности излучения в заданной точке к данному параметру. В простейшем случае весовая функция вычисляется для одной переменной с помощью полуаналитического выражения, где предполагается линейное соотношение между переменной и поглощением. Для практических вычислений весовой функции  $K_x$  оценивается только атмосферная часть этой функции, где  $x$  - параметр, для которого вычисляется весовая функция. Значение весовой функции параметра  $x$  задается следующим выражением

$$\partial K_x / \partial x,$$

где  $I$  – интенсивность излучения.

Модель ARTS реализует следующий алгоритм вычисления весовой функции. Пусть  $\sigma$  поглощение, которое определяется всеми составляющими, учитываемыми при прохождении излучения. Тогда вычисление весовой функции по параметру  $x$  выполняется численно при реализации следующего соотношения

$$K_x = \frac{\partial I}{\partial \sigma} \frac{\partial \sigma}{\partial \sigma^x} \frac{\partial \sigma^x}{\partial x},$$

где  $\sigma^x$  - поглощение, определяемое заданным параметром  $x$  (влажностью, содержанием  $O_2$ , температурой и др.). Из этого соотношения следует, что реализовать алгоритм вычисления  $K_x$  можно, вычисляя на заданной сетке:

- общее поглощение;
- поглощение, определяемое параметром, для которого вычисляется весовая функция;
- заданный параметр  $x$ , а затем вычисляя соответствующие частные производные  $\frac{\partial I}{\partial \sigma}, \frac{\partial \sigma}{\partial \sigma^x}, \frac{\partial \sigma^x}{\partial x}$ .

В случае, когда необходимо определить весовую функцию температуры  $\partial \sigma^T / \partial T$ , поглощение не может быть определено аналитически. Вместо этого общее поглощение

вычисляется для температурного профиля, который на 1 градус выше для всех высот для заданного профиля температуры. Разница между двумя матрицами поглощения интерполируется к температурному профилю заданной сетки. Это дает оценку производной поглощения по температуре для точек сетки. Единицы измерения весовой функции определяются единицами измерения интенсивности излучения и параметра, для которого определяется весовая функция. После выполнения всех итераций в конечном результате интенсивность излучения пересчитывается в яркостную температуру, и весовая функция имеет размерность  $\partial T_{\gamma} / \partial x$ . Подробное описание используемых моделей, методов расчета приведено в [2,3].

Расчеты выполнены как для безоблачных условий, так и для условий кучевой облачности  $C_u$  с суммарным водозапасом 1,5 кг/м<sup>2</sup>. Оценки значений весовых функций были получены применительно к слою атмосферы толщиной 1 км. На рис.1 показаны оценки предельных чувствительностей радиометров (полученные на основании соотношений (2,3)), необходимые для восстановления средних значений температуры (а) и объемной доли паров воды (б) в слоях тропосферы толщиной 1 км (диапазон высот 0,5÷5,5 км), в условиях наблюдений над сушей, которые являются более критичными для определения предельной чувствительности, чем измерения над водной поверхностью.

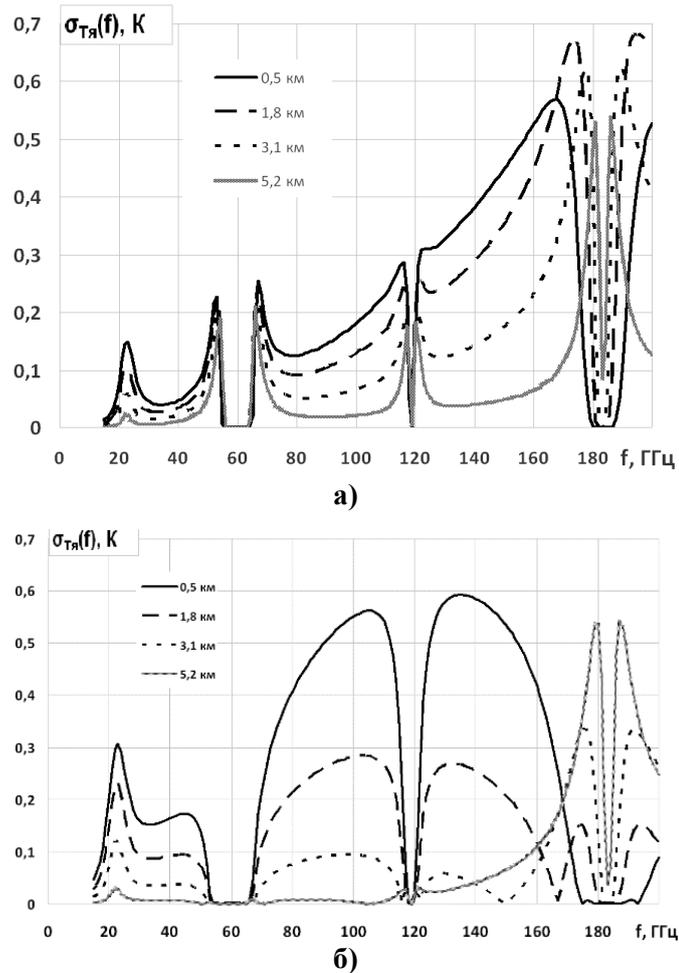
Анализ результатов, полученных для целей определения профилей термодинамической температуры нижней тропосферы, показывает, что:

1. 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 приемом в нескольких каналах с полосой пропускания порядка 1 ГГц;

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 приемом 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 приемом в нескольких каналах с полосой пропускания до 5 ГГц;

4. поскольку атмосфера вблизи частот 165 ГГц (200 ГГц) 50 ГГц (70 ГГц) при безоблачных условиях наблюдений является полупрозрачной вплоть до поверхности Земли, при восстановлении профилей термодинамических температур на высотах 0,5÷2 км необходимо обеспечить независимые измерения радиояркостных температур подстилающей поверхности в диапазоне с наименьшим поглощением частот, т.е. в диапазоне частот  $\leq 15$  ГГц, с последующей экстраполяцией результатов на диапазоны частот 165 ГГц (200 ГГц) 50 ГГц (70 ГГц) с обеспечением точностей этих оценок не хуже 0,05 К.



**Рис. 1. Предельные чувствительности СВЧ радиометрической системы, обеспечивающие восстановление термодинамической температуры (а) и содержания водяного пара (б) в слое атмосферы 1 км на заданной высоте над поверхностью суши ( $\kappa=0,9$ ). Безоблачная атмосфера.**

Аналогичные расчеты были выполнены для спутниковых СВЧ радиометрических измерений в диапазоне 15÷200 ГГц в присутствии облачности. При этом, несмотря на снижение чувствительности в высокочастотной части спектра в диапазоне 120÷200 ГГц, остальные спектральные участки для зависимостей весовых функций влагосодержания атмосферы претерпевают незначительные изменения. Весовые функции температуры атмосферы уменьшаются приблизительно в 2 раза, но при этом возможность восстановления температурных профилей сохраняется.

В [4] предложено создание всепогодного гиперспектрального радиометра в СВЧ диапазоне для работы как над океаном, так и над сушей, в котором восстановление температуры, влажности и интенсивности осадков производится, в основном, по данным спутниковых СВЧ радиометрических гиперспектральных измерений в окрестностях линий поглощения 118,75 и 183,31 ГГц. Такого рода измерения стали практически осуществимы благодаря появлению возможности мультиплексирования массива широкополосных приемников во множество спектральных каналов. В частности, в [4] предложен пример мультиплексной микроволновой гиперспектральной системы, имеющей восемь мгновенных полей зрения (МПЗ): четыре около 118 ГГц и четыре около 183 ГГц. Каждое МПЗ считается одиночным рупорным облучателем, измеряющим на двух ортогональных поляризациях (вертикальной и горизонтальной),

сигнал от каждой из которых попадает на десятиканальный спектрометр. В конечном итоге отбирается 80 каналов вблизи 118 ГГц и 20 каналов около 183 ГГц. В общей сложности сто каналов. Это приводит к повышению пространственного разрешения по высоте при восстановлении профилей температуры и содержания паров воды. Таким образом, гиперспектральные СВЧ измерения, использующие методы частотного мультиплексирования (передача с частотным разделением каналов), существенно улучшают точности восстановления профилей температуры и влажности, особенно в атмосферных условиях, при которых применение альтернативных методов затруднительно, например, при наличии плотной облачности.

Для улучшения горизонтального пространственного разрешения в работе рассмотрены 2 подхода: 1) использование антенной системы с заполненной апертурой; 2) использование антенной системы с разреженной апертурой в рамках пассивного синтеза на базе широкополосных корреляторов. Показаны возможности, перспективы и ограничения обоих подходов. При этом критерием применимости той либо иной конфигурации антенной системы являлась возможность восстановления температурно-влажностных профилей у земной поверхности.

Таблица 1. Перспективные атмосферные модули, ориентированные на восстановление температурно-влажностных профилей в нижней тропосфере

№	Диапазон частот, ГГц	Предельная точность, К	Назначение	Число каналов	Полоса канала, ГГц	D, м
1	165÷180	0,40÷0,55	Температурно-влажностный профиль атмосферы	3÷5	1,0	1,3
2	130÷150	0,30	Температурно-влажностный профиль атмосферы, радиояркая температура земной поверхности	1÷3	5,0	1,8
3	115÷125	0,15÷0,30	Температурный профиль атмосферы	>6	1,0	1,8
4	90÷110	0,50	Профиль влажности в атмосфере, радиояркая температура земной поверхности	1÷3	3,0	2,4
5	50÷55	0,15÷0,20	Температурный профиль атмосферы	6	0,150÷0,400	4,2
6	15÷20 (10÷22)	0,15÷0,20	Радиояркая температура земной поверхности	3÷5	0,150÷0,250	14 (21)

### Выводы

Выполненный анализ позволяет сделать выводы о перспективных СВЧ радиометрических модулях для восстановления температурно-влажностных профилей нижней тропосферы. Результаты анализа, в которых представлены варианты перспективных атмосферных модулей для нижней тропосферы, показаны в таблице 1 в порядке приоритета, показывающего соответствие варианта модуля решению поставленной в работе задачи восстановления температурно-влажностных профилей в нижней тропосфере. Все указанные в таблице атмосферные модули должны иметь поперечные линейные схемы сканирования, что обусловлено тем, что использование альтернативного (к линейно-поперечному) способа конического зондирования существенным образом снижает точностные характеристики, обеспечивающие

восстановление атмосферных профилей. Причиной тому является высокая чувствительность значений измеряемых параметров к изменениям углов ориентации на расчетных углах зондирования ( $53^\circ$ ), а также использование разных антенно-фидерных трактов при проведении наблюдений и работе с калибровочными эталонами. Именно поэтому в текущих и перспективных проектах все ведущие агентства вслед за NOAA перешли на линейную поперечную схему сканирования. В настоящее время на такой схеме работают атмосферные зондировщики NASA (США), СМА (Китай), INPE (Бразилия), EUMETSAT (ЕС), CNES (Франция).

Наряду с этим необходимо отметить то, что для модулей, работающих на частотах ниже 90 ГГц, реализация на космических платформах антенной системы с заполненной апертурой, имеющей раскрыт более 2 м (а при  $f < 50$  ГГц более 4 м) представляет собой значительную техническую проблему. Поэтому при анализе возможностей реализации таких модулей (модули 3-5 в таблице 1) необходимо, возможно в приоритетном порядке, рассмотреть варианты исполнения антенной системы в виде антенн с незаполненной апертурой (или в виде антенных решеток). Такими вариантами, в частности могут быть СВЧ радиометрические системы, обеспечивающие корреляционный прием сигналов от нескольких разнесенных по космическому модулю антенн.

*Работа поддержана грантом РФФИ № 16-07-00956 и Госзаданием «ЦОХКИ-1» – регистрационный номер – 01201354304, ИКРБС 216021210030.*

#### **Литература**

1. Зуев В.Е., Комаров В.С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986, 264с.
2. Buhler S., Eriksson P., Haas W., Koulev N., Kuhn T., Lemke O.. ARTS User Guide, 2003.
3. Kuhn T. Atmospheric Absorbtion Model for the Millimeter Wave Range. University of Bremen, 2003.
4. Blackwell W.J., Leslie V.R., Pieper M.L., Samra J.E. All-Weather Hyperspectral Atmospheric Sounding // Lincoln Laboratory Journal, vol. 18, no. 2, pp. 28-47, 2010.