

## ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ПРИ СОВМЕСТНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ИК- И СВЧ-РАДИОМЕТРИИ ДЛЯ ВЛАЖНОСТНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ТРОПОСФЕРЫ

*Е.В. Островский*

*ФГУП «Гидрометпоставка», г. Долгопрудный МО, eugene.ostrovsky@gmail.com*

Приводятся результаты модельных расчетов с целью определения оптимальных технических параметров комбинированной ИК- и СВЧ-радиометрической системы для решения задач определения содержания парообразной влаги в тропосфере с точностью, не уступающей современной радиозондовой системе, но обладающей более высокой оперативностью.

Показано, что применение комбинированной ИК- и СВЧ-радиометрии позволяет производить измерения содержания парообразной влаги как при высоких значениях влажности в летний сезон, так и при малом содержании водяного пара зимой.

Дистанционные радиометрические методы, развитие которых началось в середине 1960-х годов, могут использоваться для получения информации о характеристиках влажности в тропосфере. В настоящее время СВЧ- и ИК-радиометры широко применяются в системах температурного зондирования, а технические и экономические показатели подобных радиотехнических систем в последнее время приблизились к радиозондам [1]. Серии совместных измерений радиотехническими и радиозондовыми методами, выполняющиеся по всему миру, показывают, что метод наземного радиозондирования может применяться для измерения метеопараметров с точностью, не уступающей методу радиозондов [2].

Использование микроволновой радиометрии основано на связи характеристик радиотеплового излучения атмосферы в окрестности линий поглощения водяного пара с общим количеством и вертикальным распределением водяного пара. В качестве основного параметра, несущего информацию о влажности, могут быть выбраны различные величины, характеризующие интенсивность радиотеплового излучения атмосферы: радиояркость температура ( $T_{я}$ ) в выбранном направлении, полное поглощение на луче зрения или величины, производные от первых двух [3]. Так, известно, что при изменении поглощения в атмосфере, изменяется вид угловой зависимости радиояркости температуры. При этом, относительное изменение «градиента»  $\Delta T_{я}(\theta)$  выражено более ярко, чем при измерении абсолютных значений  $T_{я}(\theta)$ . В [4] также показано существование зависимости угла места, на котором наблюдается максимум «градиента» радиояркости температуры, от полного влагосодержания атмосферы.

Предлагаемый метод основан на методе углового сканирования с переключением диаграммы направленности («градиентный» метод) для измерения разности  $T_{я}$  при двух различных положениях антенны. Использование радиометра с двумя антеннами, разнесенными по углу места на заданную величину  $\Delta\theta$ , для измерения «градиента» радиояркости температуры позволяет если не полностью устранить, то значительно уменьшить влияние фоновых шумов антенны, принимаемых за счет «боковых» лепестков, на величину производной углового распределения радиояркости температуры и устранить необходимость тепловой калибровки по абсолютному значению  $T_{я}$ . Главными недостатками градиентного метода являются усложненная методика перехода от  $T_{я}(q)$  к метеопараметрам и повышенные требования к точности привязки измерений к углу места.

При выборе схемы построения аппаратного комплекса, реализующего градиентный метод измерений, возможны различные варианты решений антенного блока для переключения диаграммы направленности антенны: например, использование подвижного зеркала перед рупором

антенны или двухрупорной антенной системы. Управление антенным блоком предлагается осуществлять модулированным сигналом. Преимущество градиентного метода здесь проявляется в том, что необходимость сравнения с опорным источником излучения отсутствует, следовательно, измерения в обоих полупериодах несут в себе информативный сигнал.

Использование современной вычислительной техники в качестве модуля обработки данных с радиометра позволяет исключить необходимость учета нестабильности генератора и прочих случайных аномалий.

Использование спектрального анализа для обработки данных позволяет провести различную обработку для низкочастотных и для высокочастотных составляющих сигнала. Низкочастотная составляющая сигнала несет в себе информацию об изменении поглощения на разных углах зондирования, тогда как высокочастотная составляющая содержит информацию о тонкой структуре вертикальных профилей температуры и влажности, о попадании облачности в диаграмму направленности антенны сканирующей по углу места радиометрической аппаратуры и о случайных погрешностях аппаратуры.

Если рассматривать вертикальный профиль влажности как сочетание некоторого «стандартного» (в рамках выбранной классификации) профиля с набором инверсий, и при этом критерии классификации являются достаточно четкими, возможно создание банка данных о градиентах радиояркой температуры или их «слепок», что в свою очередь позволит выявлять общий вид профиля влажности без решения обратной задачи.

Была проведена оценка основных технических параметров радиометра, а именно: чувствительности радиометра, разброса величины измеряемого градиента, даны рекомендации по выбору угла разноса антенн и оптимальных углов сканирования в зависимости от поглощения у поверхности Земли.

В качестве модели для расчетов выбрана слоистая модель атмосферы с нулевой рефракцией. Горизонтальные изменения пренебрежительно малы, высота слоев постоянна. Диаграмма направленности антенны – игольчатая, угловой диаметр 1 градус, что много меньше угла сканирования. Оценка поглощения для кислорода и водяного пара выполнялась по [4] для полосы поглощения водяного пара 1,35 см. Вкладом остальных составляющих, в первом приближении, можно пренебречь. В численном эксперименте использовались данные о профиле влажности, температуры и давления, взятые с метеорологической сети.

Для расчета распределения вероятности изменений градиента при угловом сканировании были использованы результаты радиозондовых измерений в ЦАО (г. Долгопрудный) в 2006 году, всего 400 выпусков, а также результаты уникальных экспериментов на свободных аэростатах, которые позволили измерить точность измерения профиля влажности радиозондовым методом [1]. Данные о вертикальном профиле температуры и влажности использовались для моделирования результатов измерений градиента  $T_g$ . Чувствительность радиометра для дальнейших расчетов была ограничена 0.1К. Повышение чувствительности радиометра до 0.01К позволяет повысить точность определения экстремумов производной на ~10%.

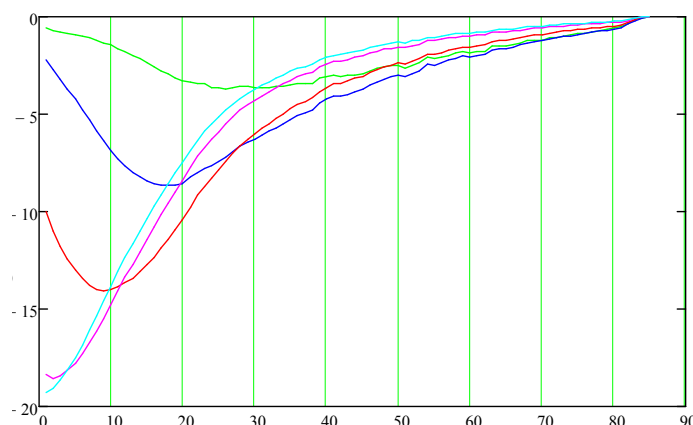
В таблице 1 и на рис. 1 приведены результаты моделирования углового сканирования для различных приземных условий. При поглощении у поверхности менее 0,6 дБ/км (например, при измерении СВЧ-радиометром в полосе 1,35 см), рабочий диапазон углов будет составлять менее 10°, что влечет за собой дополнительные сложности ввиду необходимости учета влияния рефракции. Для работы в диапазоне углов до 15° и более, когда влияние рефракции не столь выражено, можно рекомендовать к рассмотрению другие полосы поглощения, приземное поглощение на которых в данных условиях будет составлять 1-4 дБ/км. Дальнейшее увеличение поглощения приведет к увеличению погрешности определения экстремумов производной.

Анализ таблицы 1 позволяет также определить, что величины измеряемых градиентов радиояркой температуры в указанных выше условиях не превышают 20К, а в условиях, когда поглощение у поверхности земли превышает 1 дБ/км - 10К.

Поглощение $\gamma$	Средний угол наклона	Максимальное значение
---------------------	----------------------	-----------------------

<i>поверхности Земли (Дб/км)</i>	<i>системы из двух антенн(°)</i>	<i>градиента (<math>\Delta T_y(\theta)</math>, K)</i>
4	26	3,7
2	18	8,7
1	9	14,0

**Таблица 1.** Положение максимума градиента яркостной температуры для различных поглощений у поверхности земли.



**Рис. 1.** Расчет градиентов радиояркостной температуры при угловом сканировании. Угловой разнос антенн  $\Delta\theta=3^\circ$ . Поглощение у земли: 4, 2, 1, 0.6 и 0.4 дБ/км.

В условиях реальных поглощений для СВЧ-диапазона положение максимума градиента находится в диапазоне углов места  $0...40^\circ$ , в то время как углы более  $40^\circ$  являются менее значимыми и могут быть отброшены. Однако, сканирование на углах, близких к зениту ( $45-70^\circ$ ), предоставляет информацию о содержании водяного пара в верхних слоях тропосферы. В то же время, для анализа приземных инверсий высотного профиля влажности необходимо анализировать изменения  $\Delta T_y(\theta)/\Delta\theta$  в диапазоне углов места  $0...30^\circ$ .

При радиометрических измерениях угловой зависимости влияние помех находится в обратнопропорциональной зависимости от времени одного измерения. Введение ограничения на диапазон углов сканирования может позволить увеличить информативность измерений, оставляя без изменений общее время сканирования.

Другим инструментом нормализации величины «градиента» является увеличение угла разноса антенн. В результате такого увеличения изменяется и разностный сигнал. Однако, при чрезмерном угловом разносе график получается сильно сглаженным и часть информации теряется. При уменьшении угла разноса антенн требуется как большее число измерений, так и большее время каждого измерения, т.к. уровень разностного сигнала тоже становится малым. В результате расчетов было определено, что диапазон оптимальных углов разноса антенн для высоты одного слоя атмосферы более 200 метров лежит в пределах от 2 до 4 градусов.

Для пассивного влажностного радиозондирования атмосферы используются длины волн, на которых расположены полосы поглощения водяного пара. В ИК-диапазоне можно использовать длины волн 7-14 мкм, в СВЧ-диапазоне – 1,35 см.

Использование СВЧ-радиометрии при больших поглощениях летом совместно с измерениями в ИК-диапазоне позволяет получить информацию не только о полном влагосодержании атмосферы, но и о содержании в атмосфере обводненного аэрозоля и характеристиках облачности. Дополнительное введение в измерительную систему ИК-радиометрического канала диапазона 7-10 мкм или 7-14 мкм открывает возможность проведения влажностного зондирования при малом

содержании водяного пара [5,6]. В зимний период, когда поглощение в СВЧ-диапазоне мало, тем не менее возможно использование ИК-диапазона, в том числе и с помощью широкополосных ИК радиометров [7,8].

	<i>ИК</i>	<i>СВЧ</i>	<i>Комбинированный метод ИК и СВЧ</i>
<i>Преимущества</i>	Высокий уровень собственного излучения атмосферы	Аэрозоль не влияет на результаты измерений	Возможность устранения влияния аэрозоля.
	Широкие возможности использования различных длин волн для адаптации аппаратуры по сезону года	Диапазон метеоусловий – лето, весна, осень	Расширенный диапазон применения комплекса по метеоусловиям и сезонам года.
	За счет оптики можно создать малогабаритные и узконаправленные измерительные приборы	Возможно измерение облака без выпадающих осадков	Возможность получения дополнительной информации о нижней границе облачности и толщине облака, используя данные измерений ИК для СВЧ-томографического метода [9].
	Открывается возможность оценки высоты нижней границы облачности и влажности в подоблачном слое		
<i>Недостатки</i>	Подвержен влиянию аэрозоля, которое трудно поддается предсказанию	Метод предназначен для использования летом. Зимой его применение крайне ограничено.	Усложненная измерительная аппаратура и обработка данных.
	Подвержен влиянию облачности, что влечет за собой ограничение высоты зондирования и затруднения при обработке результатов измерений в подоблачном слое	Облачность и осадки требуют использования дополнительных длин волн для учета их влияния.	Увеличение стоимости комплекса
	Сложность калибровки при низком уровне излучения атмосферы	Необходима высокочувствительная аппаратура	

**Таблица 2.** Сравнение методов, в зависимости от использования разных длин волн.

Выбор той или иной длины волны (СВЧ или ИК) может быть обоснован, используя априорную информацию о поглощении в различных газовых составляющих атмосферы при заданных условиях. Однако, при этом должны использоваться иные физические параметры и связи между содержанием водяного пара и изменением радиояркостной температуры [9]. Критерием выбора в этом случае является условие, чтобы поглощение в водяном паре являлось преобладающим фактором.

Таким образом, определением применимости СВЧ-радиометрии является условие, что поглощение в водяном паре превышает поглощение в кислороде. Использование ИК-диапазона длин волн оправдано тогда, когда поглощение в водяном паре превышает поглощение в обводненном аэрозоле. Измерение приземных метеопараметров (температуры, давления,

относительной влажности и оптической дальности видимости) позволяет оценить поглощение и выбрать ту или иную длину волны для конкретных условий измерения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов В.Э., Фридзон М.Б., Ессяк С.П. Радиозондирование атмосферы. Технические и метрологические аспекты разработки и применения радиозондовых измерительных средств. г. Екатеринбург, Изд. УрО РАН, 2004.
2. Rozenkranz P.V. Water vapour microwave continuous observation: comparison of measurements and models. *Radio Sci.* 33(4). 1998.
3. Горелик А.Г., Райкова Л.С., Фролов Ю.А. Сверхвысокочастотные радиометрические методы измерения влажности в нижней тропосфере. *Метеорология и гидрология*, 1975, №5, с. 106–111.
4. Бин Б. Р., Даттон Е. Дж. Радиометеорология. Л., Гидрометиздат, 1971.
5. Новокрещенова А.С., Щукин Г.Г. К методике определения содержания водяного пара в атмосфере по совместным ИК и СВЧ радиометрическим измерениям. *Труды ГГО*, 1982, вып. 451, с. 40-49.
6. Горелик А.Г., Фролов Ю.А., Щукин Г.Г. Комплексные СВЧ- и ИК-радиометрические исследования облачности. *Труды ГГО*, 1989, вып 526, с. 3-15.
7. Белич Р.Б., Горелик А.Г., Калачинский С.Ф., Новокрещенова А.С., Фролов Ю.А., Излучение безоблачной атмосферы в интервале длин волн 8-12 мкм, *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*, 1976, т.12.
8. Величко А. П. Разработка ИК-радиометрического комплекса, обеспечивающего дистанционный контроль и исследование облаков и прозрачности атмосферы : дис.канд. техн. наук : 05.11.13 Москва, 2006, 186 с.
9. Горелик А. Г., Калашников В. В., Фролов Ю. А. Определение общего влагосодержания атмосферы по ее собственному радиоизлучению. *Тр. ЦАО*, вып. 103, 1972.