

Особенности использования метода микроволновой радиометрии для мониторинга термической стратификации различных высотных слоев атмосферы

Е.Н. Кадыгров, А.К. Князев, Е.А. Миллер

ФГБУ «Центральная аэрологическая обсерватория», 141700, Московская область, г. Долгопрудный, ул. Первомайская 3, e-mail: ldz@cao-rhms.ru

Дан анализ особенностей применения микроволновых (СВЧ) метода и аппаратуры для измерения профилей температуры различных высотных слоев атмосферы (тропосферы, атмосферного пограничного слоя, стратосферы и мезосферы).

Ключевые слова: термическая стратификация атмосферы, микроволновая радиометрия.

Peculiarities of atmospheric temperature stratification measurements by microwave radiometry

E.N. Kadygrov, A.K. Kniazev, and E.A. Miller

Central Aerological Observatory, 3 Pervomayskaya Str., Dolgoprudny, Moscow region, 141700 Russia. e-mail: ldz@cao-rhms.ru

The analysis of possibility and particularity of atmospheric temperature stratification measurements in troposphere, atmospheric boundary layer, stratosphere and mesosphere by microwave radiometry are presented.

Key words: atmospheric temperature stratification, microwave radiometry

Введение. Одним из основных, структурных параметров атмосферы является температура ее различных высотных слоев, т.е. термическая стратификация. Поэтому наиболее распространенной является классификация атмосферы по особенностям термического режима: тропосфера (0-11 км), стратосфера (11-50 км), мезосфера (50-90 км), термосфера (85-400 км), экзосфера (выше 400 км)[1]. Нижний слой тропосферы (от поверхности Земли до высоты 1.6 км) обычно называют атмосферным пограничным слоем (АПС). Традиционно термическая стратификация тропосферы и нижней стратосферы измерялась с помощью радиозондов (максимальная высота подъема - 30-40 км), а верхней стратосферы и мезосферы - с помощью метеорологических ракет (максимальная высота подъема 100 км). В последние годы количество выпускаемых в нашей стране радиозондов резко сократилась, а запуски метеорологических ракет вообще перестали производиться. При этом, наоборот, достаточно бурно развиваются дистанционные методы мониторинга термической стратификации атмосферы с использованием измерений в оптическом (лидары), инфракрасном (ИК радиометры) и радио (микроволновые радиометры, радиозатменные методы) диапазонах волн [2-11]. Данный доклад посвящен особенностям построения наземных и спутниковых микроволновых приборов для мониторинга термической стратификации тропосферы, атмосферного пограничного слоя, стратосферы и мезосферы, а также краткому описанию современных микроволновых приборов, в которых реализованы эти особенности.

Основы микроволновых измерений термической стратификации атмосферы. Возможность измерения профилей температуры атмосферы радиофизическими методами основана на особенностях распространения радиоволн миллиметрового и

сантиметрового диапазонов в атмосфере Земли . Свойством собственного теплового излучения земной атмосферы в этом диапазоне волн является чувствительность его характеристик к большому числу физико-химических параметров – температуре, влажности, водности облаков, давлению, газовому составу [6]. Методы, позволяющие использовать эти особенности, получили название пассивной радиолокации, или микроволновой (СВЧ) радиометрии. В отличие от ИК-диапазона, в радиодиапазоне можно при расчете излучения использовать не формулу Планка, а ее длинноволновое приближение (формулу Рэлея-Джинса), что упрощает расчеты [6]:

$$I(\nu, T) = 2kT \left(\frac{\nu}{c}\right)^2, \quad (1)$$

где $I(\nu, T)$ - интенсивность излучения, ν - частота излучения, T - термодинамическая температура; k - постоянная Больцмана ($k = 1.38066 \times 10^{-23}$ Дж /К); c - скорость света.

Следовательно, интенсивность излучения абсолютно чёрного тела в микроволновом диапазоне прямо пропорциональна температуре. При этом вводится понятие радиояркой (радиационной) температуры $T_{я}$, определяемой как температура такого абсолютного черного тела, интенсивность излучения которого равна I на частоте ν [6,7]. Термическое зондирование основано на приеме собственного излучения молекулярного кислорода, имеющего высокую объемную концентрацию в атмосфере (20,946 %) и наиболее высокую стабильность процентного отношения O_2 вплоть до верхней границы мезосферы, а также ряд резонансных спектральных линий в районе частоты 60 ГГц и одиночную линию на частоте 118.7505 ГГц [1,4]. Впервые такая возможность была детально обоснована почти 60 лет назад в [7]. С использованием известного уравнения переноса излучения микроволновой радиации в атмосфере получают уравнение для радиояркой температуры в случае измерения нисходящего микроволнового излучения молекулярного кислорода атмосферы (с поверхности Земли) [6,7]:

$$T_{я} = \frac{1}{\cos \theta} \int_0^{\infty} T(h) \gamma_{\nu}(h) \exp\left(-\frac{1}{\cos \theta} \int_0^h \gamma_{\nu}(h') dh'\right) dh + T_{\phi} \exp\left(-\frac{\tau_0}{\cos \theta}\right), \quad (2)$$

где $\gamma(h)$ – коэффициент поглощения на соответствующей частоте, h – высота, θ - угол отклонения от надира, $T(h)$ - искомый профиль термодинамической температуры, T_{ϕ} – температура реликтового излучения космоса (2.7 К), $\tau_0 = \int_0^{\infty} \gamma(h) dh$ - оптическая толщина атмосферы.

В случае измерения восходящего излучения атмосферы со спутника, если не учитывать излучение поверхности Земли, которое гораздо меньше излучения молекулярного кислорода на частотах резонанса в районе частоты 60 ГГц, выражение для измеряемой радиояркой температуры имеет вид [5,6]:

$$T_{я}(\nu, \theta) = \frac{1}{\cos \theta} \int_0^{\infty} T(h) \gamma(h) \left[\exp\left(-\frac{1}{\cos \theta} \int_h^{\infty} \gamma(h') dh'\right) \right] dh \quad (3)$$

Как видим, в этих уравнениях искомый температурный профиль стоит под интегралом, т.е. это типичные обратные задачи, не имеющие однозначных решений. Под обратной задачей обычно понимают цикл задач, состоящих в определении по заданным характеристикам поглощения атмосферных газов и измеренным характеристикам излучения распределений метеорологических параметров атмосферы, в частности, температуры. Существует несколько методов решения этого рода задач: статистической регуляризации, использования базисных функций, использование

регрессии наименьших квадратов, регуляризации Тихонова, нелинейный итеративный, метод Шахина, регрессионный метод, метод нейронных сетей, и др. [4,5]. Наличие большого разнообразия спектральных линий O_2 позволяет подобрать наиболее оптимальные частоты для измерений термической стратификации атмосферы. Выбрав соответствующие частоты измерения микроволновой радиации, можно измерять интенсивность излучения, генерируемого различными слоями атмосферы. К сожалению, нет прямой связи между излучением и температурой на какой-то фиксированной высоте, т.к для данной частоты излучение генерируется в конечном слое атмосферы. Если пренебречь потерями в антенно-фидерном тракте, то чувствительность микроволнового радиометра, которая является одной из основных его характеристик, обычно выражается в градусах Кельвина и записывается в виде [8]:

$$\Delta T = k \frac{T_{Ш} + T_{АТМ}}{\sqrt{\Delta f \tau}}, \quad (5)$$

где k – коэффициент, зависящий от типа схемы радиометра ($k = 0.7 \div 1.0$); $T_{Ш}$ – собственная шумовая температура радиометра; $T_{АТМ}$ – температура окружающей среды ($T \approx 300^\circ \text{K}$); Δf – ширина полосы пропускания радиометра; τ – постоянная времени.

Кроме улучшения чувствительности радиометра, важным моментом является точность расчета коэффициента поглощения O_2 , особенно для обработки температурных данных в стратосфере и мезосфере. Существует целый ряд различных моделей его расчета, наиболее популярной считается модель Розенкранца [12,13]. Согласно Розенкранцу, выражение для коэффициента поглощения O_2 записывается так [13]:

$$\gamma(\nu, T, P) = 0,330 P^2 \frac{\nu^2}{T^2} \left\{ \sum_N \Phi_N [f_N^+(\nu) + f_N^+(-\nu) + f_N^-(\nu) + f_N^-(-\nu)] + \frac{0,70 \cdot W_B}{\nu^2 + (P \cdot W_B)^2} \right\} \quad (6)$$

размерность: $[\gamma] = \left[\frac{H_{II}}{KM} \right]$; $[P] = [\text{мбар}]$; $[T] = [K]$.

В (6) учитываются квантовые переходы с номерами $N = 1 \dots 39$; ν - частота излучения; Φ_N – вероятность заселенности N -го вращательного уровня молекулы; $f_N^\pm(\pm\nu)$ - коэффициент формы линии излучения O_2 ; W_B – ширина нерезонансных линий поглощения.

Поглощение также зависит от поляризации излучения. Представленные выше уравнения (1-6) и понятия используются для оптимизации измерений различных высотных слоев атмосферы.

Тропосфера. Исторически так сложилось, что наземные микроволновые приборы сначала были созданы для мониторинга термической стратификации тропосферы, а спутниковые- тропосферы и нижней стратосферы [3-5]. Особенностью измерения температурных профилей в тропосфере является наличие в ней высоких концентраций водяного пара, облаков и осадков. Поэтому кроме измерения излучения O_2 необходимо учитывать излучение водяного пара и жидкой воды в облаках, что впрочем дает возможность измерять влагосодержание-общую концентрацию водяного пара и содержание жидкой воды в облаках [3,9,10]. Как видно из Рис.1, это должны быть многочастотные приборы: для измерения профилей температуры могут использоваться измерительные каналы в диапазоне частот 53-56 ГГц и в районе частоты 118 ГГц, для оценки водяного пара-каналы в диапазон частот вблизи 22-24 ГГц и 183.31 ГГц, а для оценки жидкой воды в облаке- каналы в окнах прозрачности в районе частоты 30-37.5 ГГц [4,5,6,9]. При этом задача восстановления профилей температуры разбивается на два этапа- на первом этапе определяются интегральные влажностные характеристики

атмосферы, а на втором этапе эти значения используются для задания ядра интегрального уравнения (4) и восстановления профилей температуры [3,4,6,9,14,15]. Какие еще особенности у наземных тропосферных температурных профиломеров? Как показали расчеты и оценки, для получения необходимой точности измерений температуры на тропосферных высотах (порядка 1°C) необходимо иметь полосы пропускания частотных каналов порядка 200-400 МГц; число каналов не менее 4; приведенную чувствительность не хуже 0.2 К; иметь высокую точность расчета коэффициента поглощения O_2 [4,14]. Первый наземный полноценный многочастотный радиометрический комплекс для мониторинга термической стратификации тропосферы был разработан в Лаборатории распространения радиоволн (Колорадо, США) в 1981г и был установлен в аэропорту Денвера [10]. Он имел 6 измерительных каналов на частотах: 20.6; 31.65; 52.85; 53.85; 55.45; и 58.8 ГГц. Приведенная чувствительность (при постоянной времени 1 с) была 0.5 К. Первый отечественный наземный радиометр для измерения профилей температуры тропосферы был разработан в НИРФИ (г. Нижний Новгород) несколько позже (в середине 80-х годов прошлого века) [14].

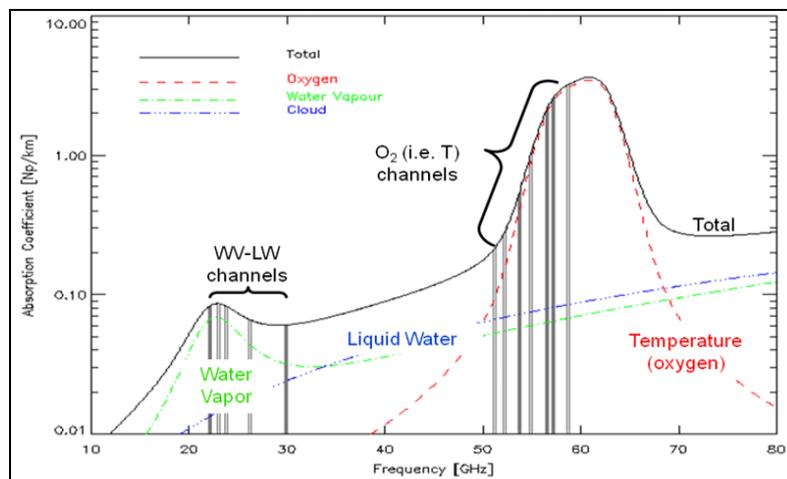


Рис.1. Поглощение радиоволн в водяном паре, молекулярном кислороде, водяном паре и в жидкой воде [8].

Он имел четыре измерительных канала на частотах 53.3; 54.0; 54.5; и 55 ГГц, приведенная чувствительность 0.8 К [14]. Из последующих следует отметить наземный радиометр МАТР (1986 г., Чалмерский Университет, США) - имел 11 измерительных каналов в диапазоне частот от 52.8 ГГц до 58.8 ГГц, приведенная чувствительность 0.15 К [4,10]; радиометр ASMUWARA (2006 г.) Бернского Университета имел 8 каналов в диапазоне частот от 18 до 58 ГГц, один канал на частоте 151 ГГц и два канала на частотах 23.6 и 31.5 ГГц [10]; 2006-2007 гг. - многоканальный радиометр GSR (Аляска, США) имел 11 каналов в диапазоне частот 50-56 ГГц, канал с двумя поляризациями на частоте 89 ГГц, 7 каналов субмиллиметрового диапазона на водяной пар на частотах 183.31 ГГц [4]. Был ряд приборов и в других научных организациях, но все они были штучными экспериментальными образцами и обеспечивали измерение профилей температуры тропосферы до высот порядка 3-4 км при наличии облачности и до 10 км в безоблачных условиях. Единственным отечественным прибором для мониторинга термической стратификации тропосферы в настоящее время является разработанный в Центральной аэрологической обсерватории в 2012 г многоканальный наземный

комплекс с патентованным названием «Микрорадком» [15]. Комплекс имеет 9 измерительных каналов со следующими частотами: 6 каналов с частотами 53.3 ГГц; 53.85 ГГц; 54.4 ГГц; 54.9 ГГц; 55.5 ГГц; 56.6 ГГц, дополнительные каналы: канал с частотой 22.224 ГГц обеспечивает измерение общего содержания водяного пара, а канал 36 ГГц-содержания жидкой воды в облаках. Комплекс обеспечивает измерение профилей температуры тропосферы до высоты 4 км при наличии облачности и до 10 км при безоблачных условиях. Канал 56.6 ГГц имеет сканирование по углу места и обеспечивает высокоточные измерения профилей температуры атмосферного пограничного слоя. В конце прошлого века появились первые коммерческие температурные профиломеры для измерения термической стратификации тропосферы. Первым был профиломер MP-3000A компании «Radiometrics» (США), затем RPG-NATPRO (Германия) [4]. Первым спутниковым прибором для измерения термической стратификации тропосферы был прибор NEMS, установленный на спутнике Nimbus-5 в 1972 году [4,5]. Позднее появились и другие приборы, обеспечивающие измерение профилей температуры до 30 км: MSU, SSM/T, AMSU (таблица 1.) [4,5].

Таблица 1. Микроволновые спутниковые приборы для дистанционного термического зондирования атмосферы (надирная геометрия измерений)

Наименование характеристик	Значения характеристики				
	NEMS	SCAMS	MSU	SSM/T	AMSU
Общее число каналов	5	5	4	7	20
Число каналов температурного зондирования	3	3	47	7	12
Диапазон частот, ГГц	53,7 - 58,8	52,9 – 55,5	50,3 – 55,5	50,5 – 59,4	50,3 – 57,6
Полоса пропускания, МГц	100	100	200	115 - 400	3 - 400
Приведённая чувствительность, К	0,4	0,4	0,25	0,4 – 0,6	0,25 – 1,2
Ширина ДН антенны	10°	10°	7,5°	11°	3,3°
Сканирование	-	±40°	±47,35°	±36°	±40°
Высотный диапазон	0 – 20	0 – 20	0 – 25	0 – 30	0 – 38
Спутник	Nimbus-5	Nimbus-6	NOAA-6	DMSP	ATN

Дальнейшим развитием стали спутниковые приборы ATMS (22 спектральных канала в диапазоне частот от 23 до 183 ГГц); AIRS (2378 спектральных канала в ИК диапазоне); прибор SSMIS (24 микроволновых канала); разрабатываются приборы GeOMAS -гиперспектральный прибор для геостационарного спутника, 72 канала температурного зондирования вблизи частоты 118.75 ГГц и 16 каналов влажностного зондирования вблизи частоты 183.31 ГГц; три спутниковых радиометра: MWS, MWI, ICI будут перекрывать своими 63 каналами огромный диапазон от 18.7 ГГц до 664 ГГц

[4,5]. По проекту STAR предполагается создание в ближайшие 5 лет 900 - канального микроволнового спутникового радиометра с синтезированной апертурой, при этом 300 температурных каналов будут вблизи частоты 60 ГГц, а 600 каналов влажностного зондирования - на частотах вблизи максимума поглощения водяного пара на частоте 183 ГГц [4,5]. Из отечественных спутниковых приборов температурного зондирования был прибор МТВЗА (21 спектральный канал в диапазоне от 18.7 ГГц до 183.31 ГГц, спутник «Метеор-3М», 2001 г.); на смену ему пришел прибор МТВЗА-ОК (спутник «Сич-1М», 2004 г.); далее прибор МТВЗА-ГЯ (спутник «Метеор-М», с температурными каналами на частотах в диапазоне 52-58 ГГц, по многим характеристикам совпадающий с прибором AMSU) [5,16]. Все указанные выше приборы обеспечивают измерение профилей температуры до высоты 30 км, т.е. полностью перекрывают тропосферу и нижнюю часть стратосферы. Планируется в РФ создание нового спутникового прибора температурно-влажностного зондирования МТВЗА-ГЯ-МП в 2024 г. [16].

Атмосферный пограничный слой. Исследования нижней тропосферы, или атмосферного пограничного слоя (АПС), расположенного между поверхностью Земли и свободной атмосферой, необходимы для целого ряда фундаментальных задач физики атмосферы и практической метеорологии и экологии. В АПС происходит обмен импульсом, теплом и влагой между подстилающей поверхностью (поверхностью суши и океана) и атмосферой [1,4]. При этом одним из важнейших метеорологических параметров АПС является термическая стратификация, характеризующая степень устойчивости состояния атмосферы. Указанный параметр АПС широко используется в системах экологического мониторинга, контроля условий распространения радиоволн, прогноза опасных метеорологических явлений, исследованиях так называемого «острова тепла» - термического купола над крупными городами, в моделях переноса загрязняющих примесей, при исследовании процессов во время солнечного затмения [1,4,18,19,20,26]. Измерение термической стратификации в АПС имеет свою специфику. Здесь часто возникают очень сложные профили температуры, с различными температурными инверсиями- приземными, приподнятыми, двойными. Это приводит к серьезным специфическим трудностям при проведении радиометрических измерений: необходимости измерений приращений в доли градусов на фоне мощного (300К) излучения атмосферы в этом диапазоне, что требует очень высокой чувствительности приемного устройства; многообразии типов профилей температуры и их сильной изменчивости, что усложняет решение обратной задачи; высоких требований к форме диаграммы направленности приемной системы [17,19]. Кроме того, профили температуры АПС практически почти невозможно измерять со спутников из-за сложностей учета вариаций излучения подстилающей поверхности. К счастью, при малых высотах в районе частоты 60 ГГц коэффициент поглощения O_2 слабо меняется, поэтому в отличие от тропосферных измерений (на склоне линии) радиометр может иметь полосу пропускания до 2 ГГц, что в соответствии с формулой (5) позволяет получить чувствительность радиометра порядка 0.1 К и даже менее (Рис.2) [4].

При этом в наземных микроволновых температурных профилемерах для АПС используется угломестный способ измерений, обеспечивающий более высокое вертикальное разрешение по сравнению с многочастотным методом [17,19,21,22]. Кроме того, использование одной частоты в районе максимума поглощения молекулярного кислорода дает уникальную возможность проведения автоматической и довольно простой калибровки таких приборов [4,19]. А именно, если антенна радиометра направлена в горизонт и есть однородность в пределах порядка 500 м от установки радиометра, то атмосфера представляет для него на этой частоте как бы идеальную микроволновую мишень, т.е. значения контактного выносного датчика

температуры профилера совпадают с дистанционно измеренной температурой радиометром [19].

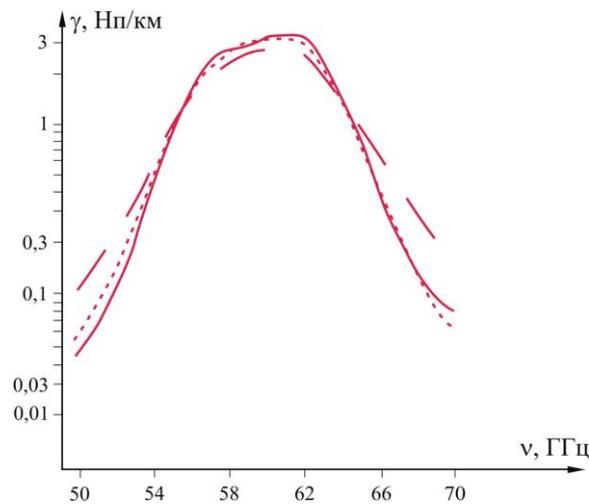


Рис.2. Зависимость коэффициента поглощения O_2 , рассчитанная по различным моделям поглощения миллиметровых радиоволн [4].

На Рис.3 приведен пример профиля АПС, измеренного наземным микроволновым температурным профилером МТР-5.



Рис. 3. Пример профиля температуры АПС, измеренного микроволновым температурным профилером МТР-5.

Имеется целый ряд успешных сравнений данных микроволновых профилеров с данными высотных метеорологических мачт, радиозондами, привязными аэростатами, лидарами, системами радиоакустического зондирования [21,22,23]. Делаются попытки использования нескольких микроволновых профилеров для измерения ветра [24]. Если в обычных профилерах ширина диаграммы направленности составляет в среднем 6° , то для полярных районов, где требуется более высокое вертикальное разрешение, ширина диаграммы направленности антенны радиометра не должна превышать 1° [25].

Стратосфера и мезосфера. В отличие от тропосферы и АПС, на стратосферных и мезосферных высотах спектральные линии O_2 не перекрываются. При этом практически отсутствует влияние водяного пара и облаков.

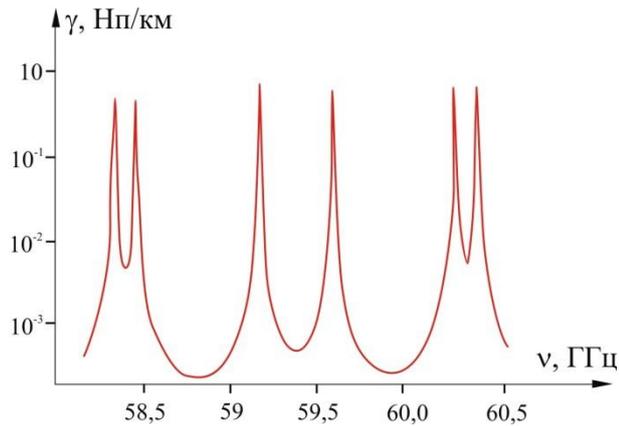


Рис. 3. Пример расчета коэффициента поглощения для высоты 40 км.

На рис. 3. представлен пример наших расчетов для высоты 40 км. Понятно, что с высотой абсолютная масса кислорода уменьшается, поэтому чем выше, тем все менее узкие полосы пропускания нужно использовать в радиометрах. А при этом в соответствии с формулой (5) ухудшается чувствительность радиометра [8]. Поэтому для измерения профилей температуры высоких слоев атмосферы используют современные малозумящие усилители СВЧ и схему прямого усиления [4,5]. Например, в приборе AMSU выбрана спектральная линия на частоте 57.290344 ГГц и 5 спектральных каналов вблизи этой линии с полосами пропускания от 3 МГц до 78 МГц [5]. Нами также была предложена свертка спектральных линий, повышающая чувствительность радиометров супергетеродинного типа [27]. При этом в спутниковых приборах для стратосферы используется в основном надирная геометрия измерений (до 50 км), а для мезосферы- лимбовая геометрия (до 100 км) [5,30]. Важным также является точность расчета коэффициента поглощения O_2 , в основном ее рассчитывают по методике [13], экспериментальная проверка которой на специально разработанных нами совместно с НПО «Эталон» спектрометрических СВЧ установках описана в [28,29]. Следует отметить, что для измерения термической стратификации атмосферы на высотах более 40 км необходимо учитывать влияние эффекта Зеемана. Из-за наличия магнитного дипольного момента у молекулы O_2 линии поглощения под влиянием магнитного поля Земли (примерно 0.5 гаусс) будут расщепляться на отдельные компоненты: каждая N^\pm линия расщепляется на $3(2+1)$ зеемановских компонент. Поэтому нужен выбор специальных спектральных линий, минимально подверженных этому эффекту, а также выбор соответствующей поляризации измерений [4,31].

Для измерения термической стратификации стратосферы используются также и наземные микроволновые спектрометрические приборы. Если проводить измерение с поверхности Земли в узких полосах вблизи резонансных частот поглощения O_2 в диапазоне 52-54 ГГц, имея высокую чувствительность (за счет большого времени накопления сигнала-порядка одного часа и более), то можно измерять приращение радиояркостных температур отдельных линий над общим фоном поглощения и восстанавливать профили температуры стратосферы. Микроволновый измерительный комплекс для измерения профилей температуры стратосферы с поверхности Земли был разработан в Институте прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород) в 2010 г. с частичной модернизацией в 2017 г. [32]. Из зарубежных наземных приборов есть прибор TEMPERA, обеспечивающий измерение профилей температуры как тропосферы, так и стратосферы [4,33].

Заключение. Рождение из радиоастрономии микроволновой радиометрии атмосферы оказалось очень востребованным. Как было показано в этом кратком докладе, появилось большое число современных спутниковых и наземных температурных профиломеров, способных обеспечить мониторинг такого важнейшего параметра, как термическая стратификация атмосферы от поверхности Земли и до высоты 100 км. Преимущества дистанционных приборов по сравнению с контактными заключаются в возможности проведения высокоточных непрерывных измерений в глобальном масштабе и в отсутствии одноразовых эксплуатационных материалов (радиозондов, метеоракет).

Литература

1. Матвеев Л.Т. Физика атмосферы. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 2000. 778 с.
2. Kadygrov E.N. Operational aspects of different ground-based remote sensing observing techniques for vertical profiling of temperature, wind, humidity and cloud structure: a review. WMO.2006.IOM Report No 89. WMO/TD No 1309, Geneva, Switzerland.: 34 p.
3. Караваев Д. М., Щукин Г. Г. Современное состояние и перспективы применения микроволновой радиометрии атмосферы // Оптика атмосферы и океана, 2015, т.28, № 12, с.1122-1127.
4. Кадыгров Е. Н. Микроволновая радиометрия термической стратификации атмосферы. Москва.: П.С. ООО «Шанс», 2020. 271 с.
5. Кутуза Б. Г., Данилычев М. В., Яковлев О. И. Спутниковый мониторинг Земли: Микроволновая радиометрия атмосферы и поверхности. Москва, Изд. ЛЕНАНД, 2015, 333 с.
6. Башаринов А. Е., Гурвич А. С., Егоров С. Т. Радиоизлучение Земли как планеты. М.: Наука.1974.188 с.
7. Meeks M. L., Lilley A. E. The microwave spectrum of the oxygen in the Earth's atmosphere // Journal of Geophysical Research.1963.V.68.P.1683-1703.
8. Есепкина Н. А., Корольков Д. В. Парийский Ю. Н. // Радиотелескопы и радиометры. М: Наука, 1973. 415 с.
9. Степаненко В. В., Щукин Г. Г., Бобылев Л. П., Матросов С. Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. Л.: Гидрометеиздат, 1987, 283 с.
10. Westwater E.R., Crewel S., C.Matzler. A review of surface-based microwave and millimeter-wave radiometric remote sensing of the troposphere// Radio Science Bulletin, September, 2004, N 310, P.59-80.
11. Яковлев О.И., Павельев А.Г., Матюгов С.С. Спутниковый мониторинг Земли: Радиозатменный мониторинг атмосферы и ионосферы. М.-Книжный дом «Либроком», 2008. 208 с.
12. Жевакин С.А., Наумов А.П. К расчету коэффициентов поглощения сантиметровых и миллиметровых радиоволн в атмосферном кислороде // Радиотехника и электроника. 1965. Т.10. № 6. С.987-996.
13. Rosenkranz P. W. Shape of the 5 mm oxygen band in the atmosphere // IEEE Trans. On Ant.and Prop. 1975. V. AP-23. No 4. P. 498-506.
14. Троицкий А. В. Дистанционное определение температуры атмосферы из спектральных радиометрических измерений в линии λ 5 мм // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1986. Т. 29. № 8. С. 878-887.
15. Кадыгров Е.Н., Горелик А.Г., Миллер Е.А., Некрасов В.В., Троицкий А.В., Точилкина Т. А., Шапошников А. Н. Результаты мониторинга термодинамического состояния тропосферы многоканальным микроволновым радиометрическим комплексом // Оптика атмосферы и океана, 2013, т.26, № 6, с.459-465.

16. Чернявский Г. М., Митник Л. М., Кулешов В. П., Митник М. Л., Черный И. В. Микроволновое зондирование океана, атмосферы и земных покровов по данным спутника «Метеор-М»- №2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. №4. С. 78-100.
17. Schonwald B. Determination of vertical temperature profiles for the atmospheric boundary layer by ground based microwave radiometry // Boundary-Layer Meteorology.No 15. 1978. P.453-464.
18. Гайкович К. П., Кадыгров Е. Н., Косов А. С., Троицкий А. В. Термическое зондирование пограничного слоя атмосферы в центре линий поглощения кислорода // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 1992 . Т. 35. № 2. С. 130-136.
19. Кадыгров Е. Н. Микроволновая радиометрия атмосферного пограничного слоя: метод, аппаратура, результаты измерений // Оптика атмосферы и океана. 2009 Т.22. № 7. С.697-704.
20. Кадыгров Е. Н., Кузнецова И. Н.. Методические рекомендации по использованию данных дистанционных измерений профилей температуры в атмосферном пограничном слое микроволновыми профиломерами: теория и практика. Долгопрудный, Изд. «Физматкнига», 2015, с. 171.
21. Kadygrov E. N., Pick D. R. The potential for temperature retrieval from an angular-scanning single-channel microwave radiometer and some comparisons with in situ observations.// Oxford Press. Meteorological Applications, 1998, V. 5, Issue 4, P. 393-404.
22. Westwater E. R., Han Y., Irisov V. G., Levskiy V., Kadygrov E. N., Viazankin S.A. Remote sensing of boundary layer temperature profiles by a scanning 5-mm microwave radiometer and RASS: Comparison Experiments.// Journal of Atmosp., and Ocean. Techn., 1999,V. 16, July , P. 805-818.9. 9.
- 23.Matsui I., Sugimoto N., Maksyutov S., Inoue G., Kadygrov E., Viazankin S. Comparison of Atmospheric Boundary Layer Structure Measured with a Microwave Temperature Profiler and a Mie Scattering Lidar.//Jpn.Journal Appl. Phys.,V.35.Port 1.No 4a.April 1996.P.2168-2169.
- 24.Kadygrov E.N., Shur G.N.,and Viazankin A.S. Investigation of atmospheric boundary layer temperature,turbulence, and wind parameters on the basis of microwave remote sensing//Radio Science. 2003.V.38.No 3. P.13.1-13.12.
- 25.Argentini S., Conidi A., Kadygrov E. Temperature measurements at Dome C using a new microwave temperature profiler//Confer.Proc., Italian Physical Society. Ed. M.Colacino.SIF. Bologna.:2004.V.89. P.215-227.
- 26.Kadygrov E.N., Miller E.A.,Troitsky A.V. Study of Atmospheric Boundary Layer Thermodynamics During Total Solar Eclipses //IEEE Transactions and Remote Sensing.2013.T.51.No 9.P.4672-4677.
27. Кадыгров Е. Н., Шапошников А. Н.. Способ дистанционного измерения температуры стратосферы в микроволновом диапазоне. А. с. № 1626912А1 от 08.1990 г.
28. Власов А. А., Кадыгров Е. Н., Куклин Е. А., Глызин В. В., Ловцова О. А.. Экспериментальное определение интенсивностей спектральных линий кислорода в полосе 5мм при низких давлениях//Оптика атмосферы.1990. Т. 3. № 4, 1990. С. 368-372.
29. Власов А. А., Кадыгров Е. Н., Косов А. С., Струков И. А., Троицкий А. В. Аэростатный эксперимент по измерению радиоизлучения атмосферы на волне 5 мм // Исследование Земли из космоса. 1990. № 5. С. 11-17.
30. Waters J. W. Microwave Limb Sounding in Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry. Edit. M.A. Jansen. New York: John Willey.1993. Chapter 8. 360 p.
31. Hill R. M, and Groodly W. Zeeman effect and line-breads studies of the microwave lines of oxygen // Physical Rev. 1954. V. 93. No5. P. 1019-1022.

32. Рыскин В. Г., Швецов А. А., Куликов Ю. Ю., Беликович М. В., Большаков О. С., Красильников А. А., Кукин Л. Н., Леснов И. В., Скалыга Н. К., Фейгин А. М. Микроволновый радиометрический комплекс для исследования термической структуры атмосферы Земли // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2016. № 8-9. С. 819-827.
33. Stahli O., Murk A., Kampfer N., Matzler C., and Friksso P. Microwave radiometer to retrieve temperature profile from surface to the stratopause // Atmos. Meas. Tech. 2013. No 6. С. 2477-2494.