

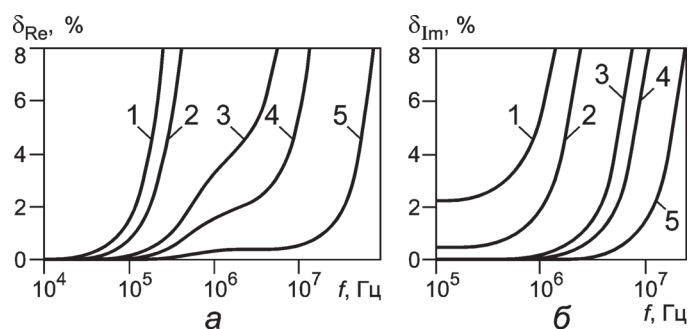


Рис. 3. Погрешность определения активной (а) и реактивной (б) составляющих ЭИ модели для различных значений a : 1—5 — $a = 10^{-2}$; 10^{-3} ; $5 \cdot 10^{-4}$; 10^{-4} ; $5 \cdot 10^{-5}$, соответственно

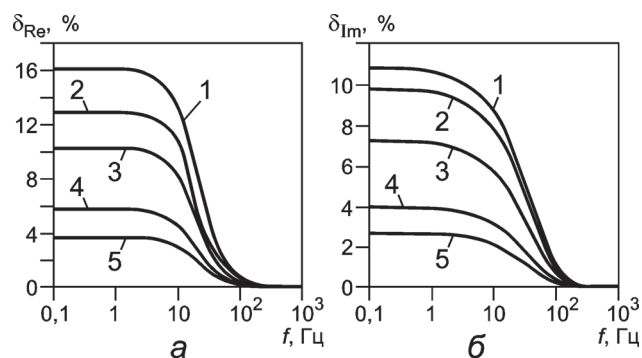


Рис. 4. Погрешность определения активной (а) и реактивной (б) составляющих ЭИ модели для различных значений b : 1—5 — $b = 0,25$; $0,1$; $0,05$; $0,02$; $0,01$, соответственно

Л и т е р а т у р а

1. Grimnes S., Martinsen O. Bioimpedance and Bioelectricity Basics. San Diego: Academic Press, 2000.
2. Мартиросов Э. Г. Технологии и методы определения состава тела человека: учеб. пособие. М.: Наука, 2006.
3. Акулов С. А., Дорошенко Р. Ю. Мониторинг состояния клеточных суспензий методом биоимпедансометрии // Вестник СГАУ им. акад. С. П. Королева (Национального исследовательского университета). 2012. № 7(38). С. 97—102.
4. Гроп Д. Методы идентификации систем. М.: Мир, 1979.

5. Fricke H. The Maxwell-Wagner dispersion in a suspension of ellipsoids // Phys. Chem. 993. V. 57. P. 934—937.
6. Эйхгофф П. Современные методы идентификации систем. М.: Мир, 1983.
7. Бессонов Л. А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 2013.
8. Калакутский Л. И., Гуржин С. Г., Акулов С. А. Моделирование биоэлектрического импеданса методом синтеза эквивалентных схем замещения // Биомедицинская радиоэлектроника. 2007. № 7. С. 35—39.

Дата принятия 21.07.2014 г.

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

520.8

Калибровка радиометра водяного пара

В. Д. ГАЛКИН¹, Г. Н. ИЛЬИН²

¹ Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, С.-Петербург, Россия, e-mail: galkin_slava@mail.ru

² Институт прикладной астрономии РАН, С.-Петербург, Россия

Рассмотрена калибровка радиометра водяного пара на основе совместных квазиодновременных измерений его содержания в атмосфере по оптическим наблюдениям ее излучения и поглощения.

Ключевые слова: атмосферный водяной пар.

The calibration of the water vapor radiometer based on the joint quasi simultaneous measurements of water vapor in the atmosphere by observations of atmospheric radiation and.

Key words: radiometric measurements, atmospheric water vapor.

В настоящее время на пунктах национального радиointерферометрического комплекса со сверхдлинной базой «Квазар-КВО» для оперативной оценки текущих значений компонента влажности тропосферной задержки распространения радиосигнала L_w предлагается использовать двух-

канальный радиометр водяного пара (РВП). Прототип РВП установлен в обсерватории «Светлое», входящей в комплекс «Квазар-КВО» [1]. С помощью РВП на частотах 20 и 32 ГГц в окрестностях линии излучения водяного пара измеряют яркостную температуру излучения атмосферы (ЯТА) с интерва-

лом до 10 с. По полученным значениям ЯТА на основе модели распространения радиосигнала в атмосфере определяют интегральное содержание водяного пара Q [2]. По значениям Q и средней температуры атмосферы $\langle T_{эфф} \rangle$, определяемой по приземной температуре или с помощью специализированных аппаратных средств, вычисляют L_w [3]. Параметры модели расчета Q уточняют по результатам сравнения с данными других средств измерений (СИ).

Радиометрические измерения Q . Радиометр обеспечивает высокое (до долей миллиметра) разрешение по задержке благодаря высокой чувствительности к изменению ЯТА. Каждый частотный канал прибора оснащен двумя нагрузками, термостатированными при 35 и 60 °С, по которым калибруют результаты измерений ЯТА [4]. Связь температурных шкал нагрузок и ЯТА осуществляется с помощью известного метода «разрезов» атмосферы [2]. Термостатированные нагрузки позволяют контролировать с большой точностью вариации коэффициента усиления приемной аппаратуры и практически исключают их влияние на ЯТА. Следовательно, калибровку РВП можно проводить методом «разрезов» исключительно при благоприятных погодных условиях и при этом обеспечивать минимальную погрешность измерений калибровочного сигнала. Эксперименты в течение более одного года показали, что средняя квадратическая погрешность измерений этих сигналов, и соответственно, абсолютных значений ЯТА не превышает 0,5 К.

Задержку L_w в диапазоне зенитных углов 0—70° можно представить в виде [3]:

$$L_w = Q(a_1 + a_2/T_{эфф}), \quad (1)$$

где $a_1 \approx 0,106 \text{ см}^3/\text{г}$, $a_2 \approx 1722,2 \text{ К} \cdot \text{см}^3/\text{г}$.

Основной вклад в погрешность измерений задержки (1) вносит погрешность оценки Q , определяемая точностью модели расчета. Как правило, погрешность радиометрических измерений Q (в зените) можно найти путем сравнения с данными зондов или навигационных спутников. Ниже рассмотрен метод калибровки Q в квазиреальном времени с помощью РВП по результатам одновременных спектральных измерений Q в оптическом диапазоне длин волн. Результаты измерений влагосодержания в атмосфере, в свою очередь, калибруют по оптическим спектральным измерениям содержания водяного пара в кювете. Параметры газа в кювете контролируют аттестованными СИ. Предварительные оценки показывают, что с помощью предлагаемого метода можно достичь относительной погрешности оперативных радиометрических измерений Q и задержки порядка единиц процентов.

Оптические измерения Q основаны на измерениях параметров линий поглощения водяного пара в спектре излучения Солнца в диапазоне длин волн 0,5—1,1 мкм. Спектральные наблюдения в оптическом диапазоне позволяют получить максимальную точность измерений Q . В оптической области спектра отличие от микроволновой шире возможности выбора подходящей линии излучения водяного

пара с оптимальными характеристиками для оценки Q [5]. Кроме того, в лабораторных условиях можно получать спектры поглощения водяного пара в большем диапазоне контролируемых изменений давления и содержания водяного пара, типичных для земной атмосферы. При этом спектральные наблюдения отдельных линий водяного пара и кислорода дают дополнительную информацию о распределении температуры и водяного пара в атмосфере в зависимости от высоты и, следовательно, о температуре $\langle T_{эфф} \rangle$.

Для измерений содержания водяного пара в качестве основной предлагается использовать линию, расположенную на длине волны 0,69438 мкм. Линия свободна от наложения других линий, и заселенность ее нижнего уровня практически не зависит от изменения температуры атмосферы. Интенсивность и полуширина этой линии приведены в [6]. Спектроскопический метод определения содержания водяного пара неоднократно использовали в солнечной и звездной спектроскопии для учета компонента влажности поглощения атмосферы при астрономических наблюдениях [5].

Для калибровки параметра Q , полученного с помощью РВП, авторы предлагают использовать спектрометр Пулковской обсерватории АСП-12 [7]. Одновременно с наблюдениями РВП спектрометр измеряет полное поглощение W в изолированной и ненасыщенной линии поглощения атмосферного водяного пара 0,69438 мкм в спектре излучения Солнца. Полное поглощение в ненасыщенной линии согласно [8]:

$$W = SQF(z) [1 - W/(4\pi\gamma)], \quad (2)$$

где S — интенсивность линии, γ — ее полуширина; $F(z)$ — воздушная масса (путь света в атмосфере), вычисляемая по формуле $F(z) = \sec z = (\sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \cos t)^{-1}$, где φ — широта места наблюдения; z , δ , t — зенитное расстояние, склонение и часовой угол Солнца.

Соотношение (2) служит для вычисления Q . Полуширина атмосферной линии водяного пара γ зависит от его распределения в атмосфере и соответствует его эффективному давлению в момент наблюдения. Согласно измерениям, выполненным в [9], изменения полуширины линии составляют несколько процентов. Чтобы погрешность определения количества водяного пара не превысила 1 %, необходимо обеспечить $W/(4\pi\gamma) \leq 0,1$ в (2). В этом случае вариациями полуширины линии можно пренебречь. Для линии водяного пара 0,69438 мкм данные условия выполняются при его содержании на луче зрения менее 10 г/см², что практически всегда наблюдается при $F(z) < 3$.

Оптическую кювету длиной 100 м и диаметром 400 мм спроектировали и построили на территории Главной (Пулковской) обсерватории РАН. Число прохождений светового пучка образцовой лампы накаливания в кювете можно изменять в пределах 1—40 с шагом 400 м при использовании системы зеркал, выполненной по схеме Уайта [10]. Таким образом, получаем набор контролируемых путей светового пучка длиной до 4000 м в газовой среде с заданными пара-

метрами. Спектрометр АСП-12 оптически согласован с кюветой и позволяет регистрировать спектры излучения лампы накаливания для каждого пути. Для повышения точности измерений содержания водяного пара с помощью кюветы целесообразно использовать и другие спектральные линии, рекомендованные в [5, 6].

Температуру и влажность в кювете измеряли с использованием пяти полимерных датчиков температуры, равномерно расположенных по длине кюветы. Датчики периодически калибровали в солевых растворах и сравнивали в климатической камере с показаниями других приборов различного типа [11].

Совместные спектральные оптические измерения влагосодержания в атмосфере и кювете показали, что относительная погрешность измерений не превышает 5 % [11]. В результате применения современных датчиков для измерений параметров газа в кювете, а также данных, полученных по другим оптическим линиям водяного пара, погрешность абсолютных измерений Q уменьшается до 1—2 %.

Заключение. Погрешность калибровки РВП зависит от выбранной методики и возможностей используемой аппаратуры. Методическими особенностями являются: проведение квазиодновременных наблюдений в близкие моменты времени и в близких азимутах и зенитных расстояниях; возможность контроля шкалы влажности в многоходовой кювете, характерной для всего диапазона изменения интегрального содержания водяного пара в атмосфере. Инструментальные возможности определяются, прежде всего, высокими техническими характеристиками РВП. Использование матричного приемника в оптических наблюдениях, позволит обеспечить погрешность 1 % при измерениях интенсивностей линий и, следовательно, содержания водяного пара. Независимый контроль влажности в кювете осуществляется с помощью промышленных аттестованных датчиков абсолютной влажности с погрешностью 1—2 %. Предполагается, что погрешность калибровки Q и значений компонента влажности тропосферной задержки распространения радиосигнала не превысит 1—2 % при использовании предложенного метода калибровки РВП.

Л и т е р а т у р а

1. Ильин Г. Н., Быков В. Ю., Стэмповский В. Г., Шишкин А. М. Высокостабильный двухканальный радиометр водяного пара для измерений тропосферной задержки в реальном времени // Труды Института прикладной астрономии РАН. 2012. Вып. 24. С. 320—324.

2. Наумов А. П. О методике определения влагосодержания атмосферы при измерениях поглощения радиоволн вблизи $\lambda = 1,35$ см // Известия АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1968. Т. 4. № 2. С. 170—181.

3. Gaikovich K. P., Markina N. N., Naumov A. P. et al. Investigation of remote sensing possibilities of the low atmosphere in the microwave range and some aspects of statistical data use // Int. J. Remote Sensing. 1983. V. 4. N.2. P.419—431.

4. Быков В. Ю., Ильин Г. Н. Регулируемые генераторы шума К-диапазона длин волн // Приборы и техника эксперимента. 2012. № 6. С. 66—69.

5. Thomas-Osip J., McWilliam A., Phillips M. M., Morrell N. Thompson I., Folkers, T., Adams F. C. Lopez-Morales M. Calibration of the Relationship Between Precipitable Water Vapor and 225 GHz Atmospheric Opacity via Optical Echelle Spectroscopy at Las Campanas Observatory // PASP. 2007. V. 119. N. 856. P. 697—708.

6. Brault J. W., Fender J. S., Hall D. N. B. Adsorption coefficients of selected atmospheric water lines // J. Quant. Spectr. Rad. Transfer. 1975. V. 15. N. 7/8. P. 549—551.

7. Галкин В. Д., У., Ниберт Т., Никанорова И. Н., Сальников И. Б., Ляйтерер У., Ниберт Т., Алексеева Г. А., Новиков В. В., Даусс Д. Определение содержания водяного пара в Пулковской многоходовой вакуумной кювете ВКМ-100 с помощью полимерных сенсоров влажности // Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове. 2006. № 218. P. 339—350.

8. Benedict W. S., Herman R., Moore G. E., Silverman S. The strengths, widths and shapes of infrared lines // Can. J. Phys. 1956. V. 34. N. 8. P. 830—850.

9. Wallace L. Brault, J. W., Brown M. Livingston W. Characteristics of Water Vapor Over Kitt-Peak as Determined from FTS Data// PASP. 1984. V. 96. N. 584. P. 836—838.

10. White I. U. Long optical paths of large aperture // J. Opt. Soc. Amer. 1942. V. 32. N. 5. P. 285—288.

11. Галкин В. Д., Сальников И. Б., Никанорова И. Н., Ляйтерер У., Ниберт Т., Алексеева Г. А., Новиков В. В., Ильин Г. Н., Пахомов В. П. Лабораторный комплекс для калибровки фотометров, использующих оптический метод определения содержания водяного пара в атмосфере Земли // Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове. 2004. № 217. С. 472—484.

Дата принятия 01.09.2014 г.