

О точности определения полной массы водяного пара и водозапаса облаков при двухчастотном измерении микроволнового излучения атмосферы

Р.А. Казарян, Б.Г. Кутуза

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 125009, Москва, ул Моховая, д. 11, корп. 7 E-mail: kutuza@cplire.ru

Проведены модельные расчеты влияния инструментальных и методических ошибок определения температуры облака на определение водозапаса облаков и общей массы водяного пара при двухчастотном измерении микроволнового излучения атмосферы. Вычисления проводились на частотах 19 ÷ 45 и 70 ÷ 100 ГГц. Рассматриваются ошибки, связанные с точностью измерения яркостной температуры, высотном распределением температуры и других параметров.

Model calculations of the influence of instrumental and methodological errors in determining the temperature of the cloud to define water content of clouds and the total mass of water vapor in the two-frequency atmosphere microwave radiation measurements have been carried out. Calculations were performed at frequencies of 19 ÷ 45 and 70 ÷ 100 GHz. In calculation errors associated with the measurement accuracy of the brightness temperature, the height distribution of temperature and other parameters have been considered.

Двухчастотный СВЧ радиометрический метод определения интегральных метеопараметров влажности и водности широко используется при наблюдениях с земли и с летательных аппаратов (смотрите например: [1-4]). Однако ряд вопросов точности данного метода остаются открытыми. Например, подробно не исследованы вопросы влияния температуры облака и ее высотного распределения на точность определения полной массы водяного пара Q , водозапаса облаков W . Известно, что мощность развитых кучевых облаков может достигать 5км и в этих случаях температура в облаке существенно меняется.

В настоящей работе рассматривают влияние инструментальных ошибок яркостной температуры и методических ошибок в знании поглощения в облаке на точность определения интегральных параметров [2,3]. Прямые измерения температуры облака достаточно сложно, так как требуют проведения самолетных и зондовых измерений. Двухчастотный радиометрический метрический метод определения параметров атмосферы чувствителен к ошибкам измерения яркостной температуры и ошибкам определения исходных параметров [3,4]. Поэтому в данной работе проведены модельные вычисления. Поглощение электромагнитных волн в облаке для данной длины волны определяется диэлектрической проницаемостью воды, которая зависит от температуры и фазового состава облака. Температура облаков меняется в широком диапазоне от 25 ÷ - 60°C [5].

Связь яркостной температуры нисходящего излучения атмосферы с высотными распределениями метеопараметров определяется уравнением:

$$T_{\text{ярк}}^{\downarrow}(h) = \int_0^{\infty} T(h) \gamma(h) e^{-\int_0^h \gamma(x) dx} dh, \quad (1)$$

где $T_{\text{ярк}}^{\downarrow}$ – нисходящее излучение атмосферы,

T – высотный температурный профиль атмосферы,

γ – коэффициент поглощения.

Коэффициент поглощения в атмосфере можно разделить на три части: поглощение в кислороде, водяном паре и облаке. Коэффициент поглощения в облаке описывается следующим соотношением:

$$\gamma_{обл}(h) = \frac{0,6\pi}{\lambda} w \operatorname{Im} \left(\frac{\varepsilon_c - 1}{\varepsilon_c + 2} \right), \quad (\text{неп / км}), \quad (2)$$

где ε_c – комплексная диэлектрическая проницаемость воды, которая является функцией от температуры.

$$\varepsilon_c = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_0}{1 + i \frac{\Delta\lambda}{\lambda}} + \varepsilon_0 = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_0}{1 + \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right)^2} + \varepsilon_0 - i \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \times \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_0}{1 + \left(\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \right)^2}, \quad (3)$$

где $\Delta\lambda = 2\pi c \tau_p \frac{\varepsilon_s + 2}{\varepsilon_0 + 2}$, τ_p – время релаксации молекул воды в секундах,

c – скорость света в см/сек,

ε_s – статическая диэлектрическая проницаемость воды (на частотах $\nu \ll \frac{1}{\tau_p}$),

ε_0 – оптическая диэлектрическая проницаемость воды (на частотах $\nu \gg \frac{1}{\tau_p}$).

Форму $\gamma_{обл}$ в значительной степени характеризует τ_p время релаксации:

$$\tau_p = \left[\exp \left\{ 9,8 \left(\frac{273}{T_o + 273} - 0,955 \right) \right\} \right] \cdot 10^{-12}, \quad \text{с} \quad (4)$$

T_o – температура облака в Цельсиях, τ_p – время релаксации[5].

Статическая диэлектрическая проницаемость ε_s зависит от температуры. Однако параметры, которые можно вычислить из радиометрических измерений (водозапас, полная масса водяного пара) связаны с полным поглощением в атмосфере.

Известно, что полное поглощения в атмосфере в большей степени зависит от кислорода, водяного пара и водозапаса облаков. Поглощения можно представить в формуле следующим образом:

$$\tau = \tau_{o_2} + K_p(\lambda) \cdot Q + K_w(\lambda, T_o) \cdot W \quad (5),$$

где τ_{o_2} – полное поглощение в кислороде,

Q – полная масса водяного пара,

W – водозапас облаков.

K_p и K_w некоторые весовые функции, которые зависят от длины волны, а вторая, еще и от температуры облака. Ошибки определения Q и W связанные с ошибками измерения вычисляются формулой:

$$\frac{\delta Q}{Q} = \frac{\sqrt{K_w^2(\lambda_2) \delta \tau^2(\lambda_1) + K_w^2(\lambda_1) \delta \tau^2(\lambda_2)}}{\Delta \tau(\lambda_1) K_w^2(\lambda_2) - \Delta \tau(\lambda_2) K_w^2(\lambda_1)} \quad (6),$$

$$\frac{\delta W}{W} = \frac{\sqrt{K_p^2(\lambda_2) \delta \tau^2(\lambda_1) + K_p^2(\lambda_1) \delta \tau^2(\lambda_2)}}{\Delta \tau(\lambda_1) K_p^2(\lambda_2) - \Delta \tau(\lambda_2) K_p^2(\lambda_1)} \quad (7),$$

где $\Delta \tau(\lambda) = \tau(\lambda) - \tau_{o_2}(\lambda)$,

где $\tau(\lambda)$ - полное поглощение микроволнового нисходящего излучения в атмосфере, $\tau_{O_2}(\lambda)$ поглощение в кислороде на волне λ .

$\delta\tau(\lambda)$ - ошибка измерения связанная с неточным определением T_{cp} и неточностью измерений T_d .

Для расчетов использовалась следующая модель облачной атмосферы. Высотное распределение температуры (градиент в тропосфере $6,5^\circ\text{C}/\text{км}$), давления и влажности соответствуют стандартной модели.

Вычисления были проведены при значениях температуры облака от -30 до 20°C . Показано, что температура облака меняет не только величину яркостной температуры, но и форму её спектра, особенности в области переохлажденных капель. Вычисления были проведены в диапазоне $10 \div 45$ и $70 \div 100$ ГГц (вблизи частоты 60 ГГц резко увеличивается резонансное поглощение кислорода). Результаты расчетов приведены на рисунках 1-6.

На Рис.1. представлен микроволновый спектр нисходящего излучения атмосферы, влажность у земли соответствует нормальным условиям $7.5 \text{ г}/\text{м}^3$, а температура у земли составляет 283К.

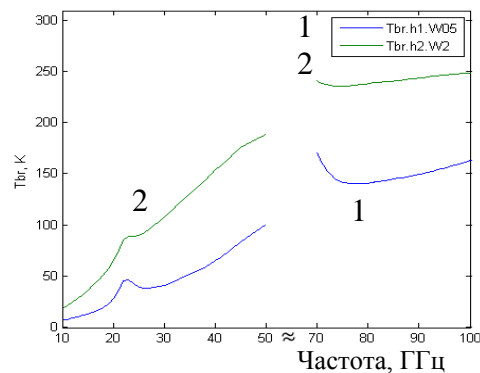


Рис 1. Яркостная температура облачной атмосферы в зенитном направлении в зависимости от частоты. 1. - запас облака равен $0.5 \text{ кг}/\text{м}^2$, мощность - 1 км; 2. - запас облака равен $2 \text{ кг}/\text{м}^2$, мощность - 2 км.

Рис. 2. показывает зависимость от частоты ошибки определения водозапаса облака при двухчастотном измерении, одна частота из которых 22 ГГц, а вторая варьируется в широком диапазоне. На рисунке приведены две кривые при ошибке измерения яркостной температуры 1К и ошибки определения средней температуры 2К. график показывает 2 минимума вблизи 18ГГц и 37 ГГц, для двух значений водозапаса облаков.

Рис. 3. иллюстрирует ошибку определения полной массы водяного пара в зависимости от частоты. Можно увидеть, что относительная ошибка определения полной массы водяного пара стала меньше по всей частоте, однако при водозапасе $2 \text{ кг}/\text{м}^2$ меняется ход кривых на частотах от 80 до 100 ГГц, и значительно отличается от тех же отрезков для водозапас облаков $0.5 \text{ кг}/\text{м}^2$.

В рис. 4. приведена зависимость производной яркостной температуры по температуре облака от температуры облака для 4 частот, при значении водозапаса $0.5 \text{ кг}/\text{м}^2$. Диапазон изменения температуры у земли составил -10 до 10°C . В таблице 1. приведены некоторые значения производной яркостной температуры.

На рис. 5. и рис 6. Приведены зависимости ошибки определения водозапаса и полной массы водяного пара в зависимости от точности определения температуры облака. Минимальные значения ошибок бывают вблизи 21 и 25 ГГц для полной массы водяного пара, а для водозапаса вблизи 27 ГГц.

В работе также приведен график с вычислениями Q и W (рис 7.) по итогам двухчастотного измерения на частотах 22 и 25 ГГц [6,7].

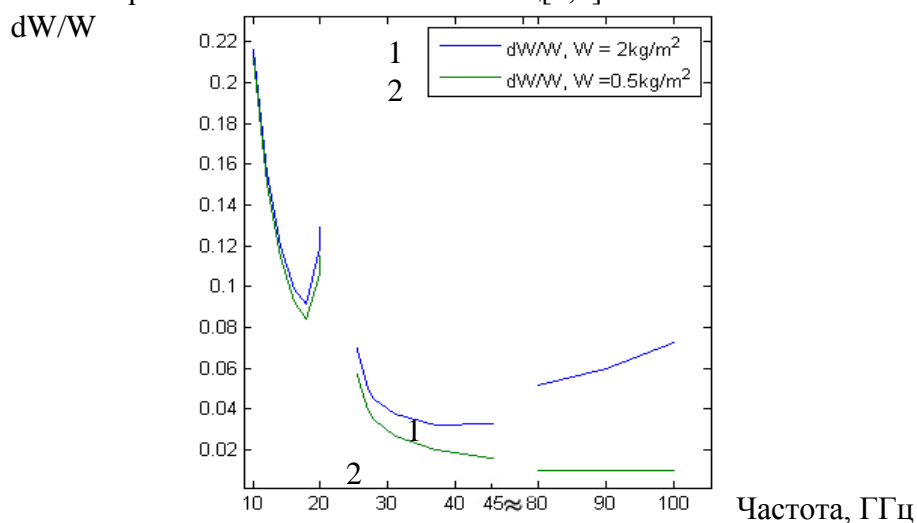


Рис. 2. Инструментальные ошибки определения водозапаса облака при значении среднего водозапаса облака 0,5 (кривая 2) и 2кг/м² (кривая 1). В модельных расчетах принято: влажность у поверхности Земли - 7.5г/м³, температура воздуха у поверхности Земли - $T_0 = 10^\circ\text{C}$. Ошибка измерения яркостной температуры составляла 1К, ошибка определения средней температуры атмосферы - 2К.

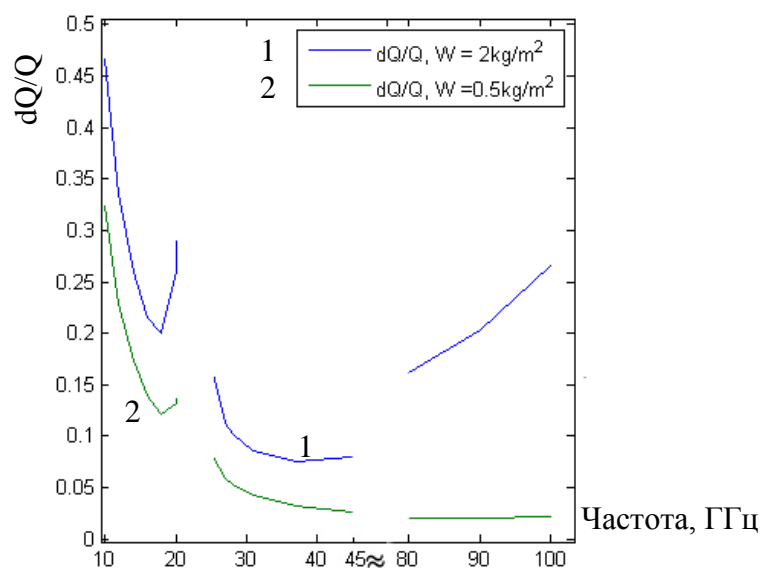


Рис. 3 Инструментальные ошибки определения полной массы водяного пара при значении среднего водозапаса облака 0,5 (кривая 2) и 2кг/м² (кривая 1). В модельных расчетах принято: влажность у поверхности Земли - 7.5г/м³, температура воздуха у поверхности Земли - $T_0 = 10^\circ\text{C}$. Ошибка измерения яркостной температуры составляла 1К, ошибка определения средней температуры атмосферы - 2К.

В таблице 1 приведены расчетные значения производной яркостной температуры от температуры облака.

Таблица 1.

$dT_{я}/dT_{обл}$		f, ГГц			
		18	22	25	37
$T_{обл}$	0	-0,3106	-0.3597	-0.4790	-0.8327
	-5	-0,3616	-0.4089	-0.5331	-0.8253
	-10	-0,4142	-0.4512	-0.5707	-0.7472
	-20	-0,4889	-0.4562	-0.5139	-0.2927

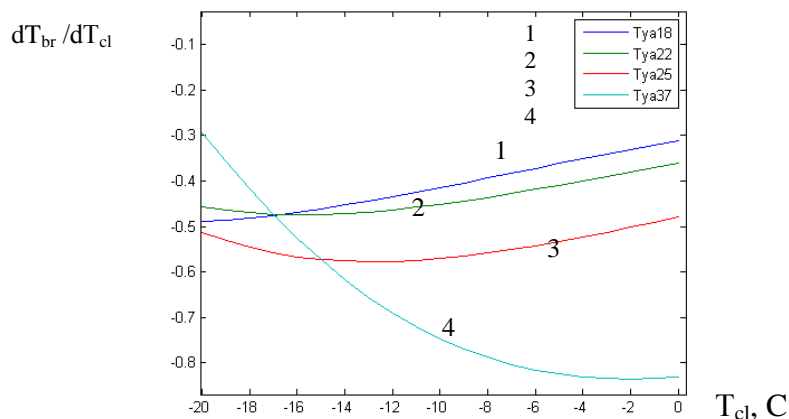


Рис. 4. Зависимость производной яркостной температуры от температуры облака на 4 частотах 18ГГц, 22ГГц, 25ГГц, 37ГГц, диапазон изменения яркостной температуры у земли от -10°C до 10°C .

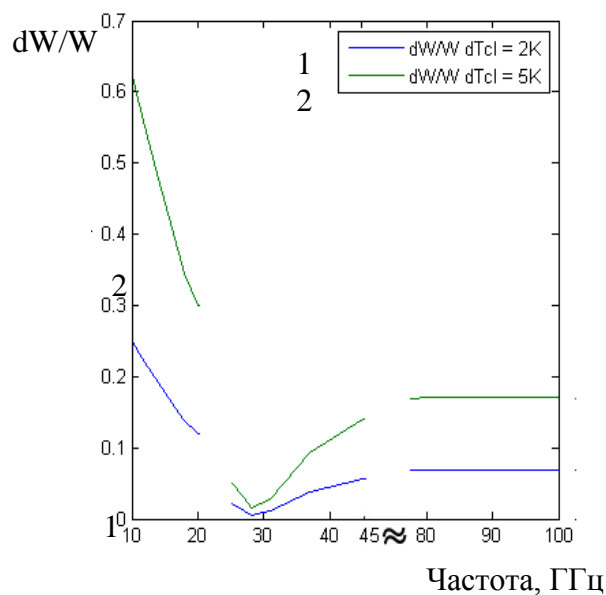


Рис. 5. Ошибки определения водозапаса при водозапасае 0.5 кг/м^2 , влажностью 7.5 г/м^3 , $T_{cl} = -20^{\circ}\text{C}$ температура облака, и ошибках определения температуры облака $dT_{cl} = 2\text{K}$ (кривая 1.) и 5K (кривая 2.)

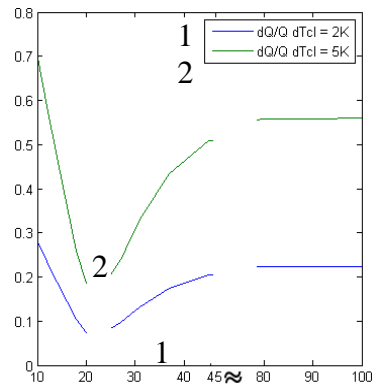


Рис. 6. Ошибки определения полной массы водяного пара при водозапасае 0.5 кг/м^2 , влажностью 7.5 г/м^3 , $T_{cl} = -20^\circ\text{C}$ температура облака, и ошибках определения температуры облака dT_{cl} 2K(кривая 1.) и 5 К (кривая 2.)

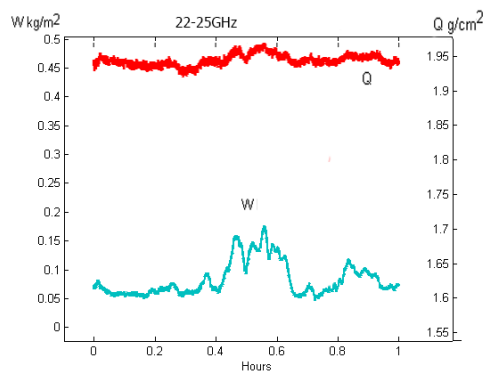


Рис 7. Результат определения Q полная масса водяного пара, W водозапас облаков на основании измерений яркостной температуры на двух частотах сделанных 11 сентября 2013 года на частотах 22 и 25 ГГц. Промежуток времени измерений примерно соответствует 1 часу.

Литература

1. Башаринов А.Е., Гурвич А.С., Егоров С.Т. Радиои兹лучение Земли как планеты. М.: Наука. 1974. 187 с.
2. Башаринов А.Е., Кутуза Б.Г. Исследование радиои兹лучения и поглощения облачной атмосферы в мм и см диапазоне волн // Труды ГГО. 1968. Вып. 222. С. 100.
3. Аквилонова А. Б., Кутуза Б.Г. . Радиотепловое и兹лучение облаков // Радиотехника и электроника. 1978. Т. 23, № 9. С. 1792.
4. F Barbaliscia, E Fionda, PG Masullo "Ground-based radiometric measurements of atmosphere brightness temperature and water contents in Italy", 1998 , Radio Science vol. 33 (3),p 697706
5. Минервин В.Е. "Тр. Центр. аэролог. обс.", 1965, вып. 64, с. 52 -66
6. Cruz Pol, S. L., C. S. Ruf and S. J. Keihm, "Improved 20-32 GHz Atmospheric Absorption Model," Radio Science, Vol. 33, No. 5, pp1319-1333, September-October 1998.
7. Cruz Pol, S. L., C. S. Ruf and S. J. Keihm, "Improved 20-32 GHz Atmospheric Absorption Model", IGARSS '96 Symposium, Vol. 3, pp 1435-1437, 1996.
8. Barrett A.H., "Mem. Roy. Sci. Liege", 1963, vol. 8, P. 197 – 219
9. Башаринов А. Е., Кутуза Б. Г. Определение температурной зависимости времени релаксации молекул воды в облаках и возможности оценки эффективной температуры капельных облаков по СВЧ радиометрическим измерениям, Изв. выс. уч. зав., Радиофизика, 1974, т. XVII, №1, с 5