

## О предельных характеристиках спутникового радиометра-спектрометра в диапазоне 6–220 ГГц

Ю.Б. Хапин<sup>1</sup>, А.В. Кузьмин<sup>1</sup>, А.Г. Семин<sup>2</sup>, А.В. Утеев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт космических исследований РАН, Москва, Россия*

*E-mails: yuhapin@gmail.com, kuzmin@asp.iki.rssi.ru, uteev@bk.ru*

<sup>2</sup> *Пензенский государственный педагогический университет, Пенза, Россия*

*E-mail: semin@sura.ru*

К спутниковым микроволновым радиометрам, предназначенным для прецизионных радиоярких поляризационных измерений, предъявляются высокие требования по ряду радиотехнических параметров: высокой потоковой эффективности, малому уровню бокового излучения, кроссполяризации, «переливанию». Для абсолютной калибровки радиометра при использовании температуры космоса (2,7 К) и «горячего» эталона (350 К) необходима минимизация фонового излучения Земли и платформы в первом случае, и космоса и платформы во втором случае. Также требуется высокая стабильность малошумящих входных устройств по коэффициенту усиления и шумам. И, наконец, стабильность параметров привода – периода и угловой скорости вращения. Настоящая работа посвящена возможности реализации предельной точности абсолютных измерений яркостной температуры системы атмосфера – океан микроволновым радиометром-спектрометром нового поколения (МРС), работающим в диапазоне 6,8 (В, Г); 10,6 (В, Г, ± 45°); 18,7 (В, Г, ± 45°); 22,2 (Г); 36 (В, Г, ± 45°); 85 (В, Г); 118 (6 уровней); 150 (В, Г); 183 (6 уровней) ГГц.

**Ключевые слова:** радиометрия, микроволновый радиометр, яркостная температура, радиометр-спектрометр.

### Введение

Основные тенденции развития микроволновой радиометрии в ДЗЗ в последнее время связаны, с одной стороны, с увеличением диаметра антенн, количества каналов как по частоте так и по принимаемым поляризациям, а с другой стороны, с улучшением точностных характеристик радиометров. Для прецизионных измерений радиояркихостей предъявляются высокие требования по ряду радиотехнических параметров антенны: высокой потоковой эффективности, малому уровню бокового излучения, кроссполяризации, «переливанию». Также необходимо обеспечить стабильность малошумящих входных устройств по коэффициенту усиления и шумам. Кроме того, нужно выполнить условие нелинейности детектора в диапазоне 2,7–350 К. Для абсолютной калибровки радиометра при использовании температуры космоса (2,7 К) и «горячего» эталона (350 К) необходима минимизация фонового излучения Земли и платформы в первом случае, и космоса и платформы во втором.

Учитывая опыт разработки спутникового радиометра интегрального влажностного зондирования атмосферы (МИВЗА), зарубежных разработок радиометров, и на основе проведенного анализа техники малошумящих устройств предложен проект микроволнового радиометра-спектрометра (МРС) с предельными характеристиками в спектре частот 6,8 (В, Г); 10,6 (В, Г, ±45°); 18,7 (В, Г, ±45°); 22,2 (Г); 36 (В, Г, ±45°); 85 (В, Г); 118 (6 уровней); 150 (В, Г); 183 (6 уровней) ГГц.

МРС включает 4-поляризационные измерения на частотах 10,6; 18,7 и 36,0 ГГц, что позволяет определять направление и скорость приводного ветра. Кроме того, радиометр предоставляет детальное восстановление водяного пара по многоуровневым измерениям (8 уровней), что особенно важно для тропической зоны.

### Антенный блок и блок калибровки

В табл. 1 приводятся основные характеристики радиометра–спектрометра МРС. Конструкция антенного блока, включает в себя антенную систему со смещенным зеркалом и девятью рупорами, микроволновые приемники на соответствующие частоты. За основу построения радиометра была взята схема (Волков, Хапин, 2004; Кузьмин, 2005). Схема была дополнена каналом 150 ГГц и каналами для восстановления профилей температуры и влажности – 118 и 183 ГГц. Проведены расчеты характеристик антенны с дополнительными каналами и расчеты точности измерения яркостных температур.

Таблица 1. Технические характеристики МРС (основные характеристики для антенны диаметром 1000 мм и высоты орбиты 830 км)

Параметр	МРС								
	6,8	10,6	18,7	22,0	36,0	85,0	118,75	150,0	183,3
Частота, ГГц	6,8	10,6	18,7	22,0	36,0	85,0	118,75	150,0	183,3
Количество каналов	2	4	4	1	4	2	6*	2	6**
Поляризация	Г, В	Г, В, ±45	Г, В, ±45	Г	Г, В, ±45	Г, В	Г	Г, В	Г
Динамический диапазон, К	2,7–350								
Потоковая эффективность	0,972	0,974	0,976	0,976	0,979	0,984	0,986	0,987	0,99
Чувствительность на элемент разрешения, К	0,1	0,25	0,3	0,2	0,3	0,35	0,7	0,4	0,55
Точность измерения ТЯ, К	не хуже 1								
Элемент разрешения, км	75 × 130	48 × 80	27 × 48	23 × 39	14 × 25	6 × 10	6 × 10	6 × 10	6 × 10

\* На частоте 118,75 ГГц супергетеродинный двухполосный приемник с шестью спектральными каналами, ширина полос УПЧ 150 МГц.

\*\* На частоте 183,3 ГГц супергетеродинный двухполосный приемник с шестью спектральными каналами, ширина полос УПЧ 500 МГц.

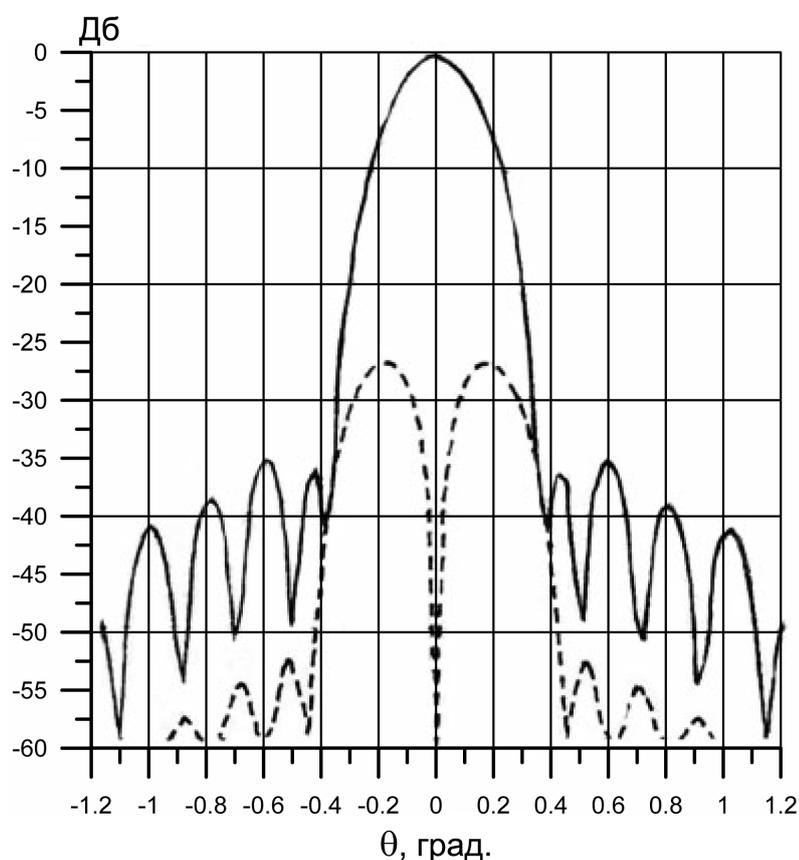
Блок калибровки состоит из: «горячего» излучателя – блока широкоапертурного излучателя (БШИ) – и зеркала «холодного» космоса, переизлучающего радиояркостную температуру космоса в апертуру антенны. БШИ и калибровочное зеркало монтируются внутри антенного блока.

Моделирование облучателей. Характеристики антенны во многом определяются параметрами облучателей. С целью определения экспериментальных характеристик облучателей и использования их в качестве входных для расчета характеристик антенны был разработан блок облучателей, который состоит из девяти разнесенных рупоров в диапазоне 6–183 ГГц, являющихся 2-модовыми рупорами Поттера. Эти рупора имеют достаточную

полосу пропускания и малые габариты, что вполне удовлетворяет требованиям для радиометра. Измерения диаграмм направленности облучателей производились на измерительном стенде в безэховой камере в диапазоне 6–85 ГГц ввиду отсутствия измерительных средств на частотах 118, 150 и 183 ГГц. Рабочий динамический диапазон амплитудных измерений составил 45 дБ. Погрешность измерений амплитуды поля – в пределах  $\pm 0,5$  дБ до уровней  $-30$  дБ. Трактовые измерения КСВН на входах облучателей проводились по стандартной методике с использованием панорамных измерителей и волноводных метрологических элементов.

Расчет характеристик антенны. Для проведения расчетов задавалась форма поверхности зеркала и его границы, а также положение и измеренные характеристики облучателей для определения характеристик всей антенны в целом. Ниже приводятся результаты расчетов для случая одной (вертикальной) поляризации. Диаграммы направленности облучателей обладают хорошей осевой симметрией и характеристики антенны для горизонтальной и вертикальной поляризаций близки друг к другу. Для примера приводятся данные для частот 85,0 и 18,7 ГГц.

На *рис. 1* представлены сечения диаграммы направленности антенны по основной и кроссовой поляризациям, рассчитанные для частоты 85 ГГц вблизи направления максимума, которое совпадает с направлением фокальной оси. Боковые лепестки не превышают уровня  $-35$  дБ. Кроссполяризация, связанная с несимметричностью зеркала, проявляется вазимутальном сечении. Напомним, что при расчете не учитываются потери в рупоре.



*Рис. 1. Сечения диаграмм направленности антенны по основной и кроссовой поляризациям для частоты 85 ГГц*

На рис. 2 представлены сечения диаграмм направленности антенны для частоты 18,7 ГГц. Вследствие выноса фазового центра облучателя из фокуса направление максимума луча не совпадает с направлением фокальной оси. Угловое смещение составляет 2,32 градуса по азимуту и 0,02 градуса по углу места. Диаграммы направленности в обоих частотных диапазонах отличаются низким уровнем кроссполяризации и низким уровнем боковых лепестков.

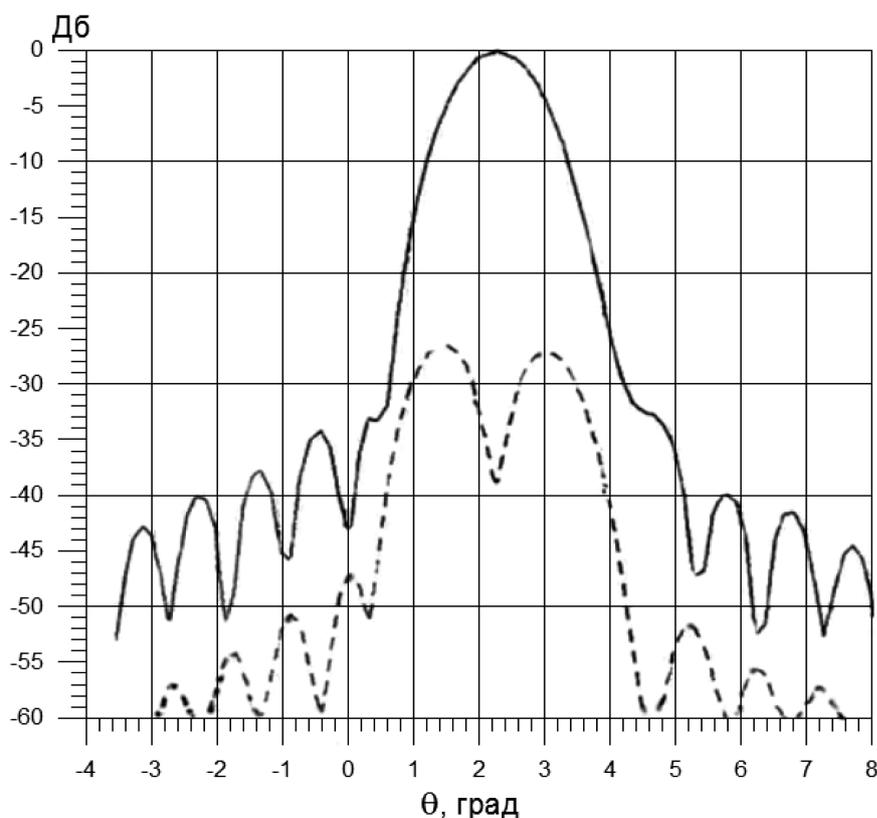


Рис. 2. Сечения диаграмм направленности антенны по основной и кроссовой поляризациям для частоты 18,7 ГГц

Расчетные характеристики для ширины луча, потоковой эффективности ( $K_{\text{пот}}$ ), боковому излучению ( $K_{\text{бок}}$ ), кроссполяризации ( $K_{\text{крос}}$ ) и «переливанию» ( $K_{\text{пер}}$ ) сведены в табл. 2.

Таблица 2. Расчетные характеристики антенны

Частота, ГГц	$K_{\text{пот}}$	$K_{\text{бок}}$	$K_{\text{крос}}$	$K_{\text{пер}}$	ДНА (-3 дБ), град
6,8	0,972	0,017	0,005	0,006	3,5
10,6	0,974	0,015	0,005	0,006	2,22
18,7	0,976	0,018	0,001	0,05	1,24
22,0	0,976	0,018	0,001	0,005	1,07
36,0	0,979	0,015	0,001	0,005	0,72
85,0	0,984	0,012	0,001	0,003	0,27
118,75	0,986	0,011	0,001	0,003	0,27
150,0	0,987	0,01	0,001	0,003	0,27
183,3	0,99	0,006	0,001	0,003	0,27

\* Коэффициент  $K_{\text{пот}}$  получен для мощности в главном лепестке ДНА

Следует отметить, что высокая потоковая эффективность обусловлена выбором облучателей с высокой направленностью. Уровень облучения кромки зеркала составляет около –20 дБ относительно центральной части. При этом «перелив» энергии облучателя за край зеркала пренебрежимо мал, что важно для радиометрической антенны.

Однако сильное спадание первичного поля к краю зеркала приводит к недоиспользованию периферийной поверхности апертуры, а значит, к некоторому снижению коэффициента усиления антенны и расширению луча по сравнению со случаем 10–12 дБ спада поля к краю апертуры. Тем не менее, такой вариант при некотором проигрыше в разрешающей способности (~10%) позволяет избежать неприятностей, связанных с боковым излучением и «переливом» антенны, а значит, добиться большей точности в измерении яркостной температуры.

Антенна радиометра МИВЗА. В качестве антенны в радиометре МИВЗА использовалась двухзеркальная антенна Грегори. Это многолучевая параболическая система с тремя гофрированными рупорами. Был проведен расчет радиотехнических характеристик антенны и экспериментально измерен коэффициент усиления антенны на частотах 20, 35 и 94 ГГц. Получено совпадение с расчетом не более 0,1; 0,2 и 1 дБ, соответственно. Потоковая эффективность равна 0,92; 0,93 и 0,95. Причем на частотах 20 и 35 ГГц она равна 0,92 и 0,93 и является низкой, но практически предельной для двухзеркальной антенны. Примерно такие же характеристики получились в SSM/I.

Сравнение результатов исследований антенн радиометров MPC и МИВЗА показывает, что изготовленная антенна MPC может иметь высокие параметры, близкие к приведенным в *табл. 2*.

Несколько слов об абсолютной калибровке MPC. Так же тщательно рассчитывались калибровочные характеристики в режимах, когда рупора смотрят на бортовой широкоапертурный излучатель (БШИ). БШИ изготавливается на основе пирамидального кремния, с включенными в него термодатчиками. БШИ устанавливается на платформе с температурой  $+5 \pm 1^\circ\text{C}$ , тыльная и боковая сторона у него защищены теплоизоляционным материалом ЭФТИ. Подобный БШИ использовался в МИВЗА.

Малозумящие приемные устройства. Как и для известной нам техники малозумящих приемных устройств в диапазоне 6–183 ГГц, шумовая температура принималась равной 120–750 К, соответственно, включая потери в рупорах. Причем в диапазоне 6–85 ГГц – приемники прямого усиления, а на остальных частотах – приемники с субгармонической накачкой.

Проверялась стабильность приемников на частотах 6,8 и 35 ГГц с учетом компенсационного приема с периодической калибровкой. В течение 25–30 с приемники показали стабильную работу. На этих же частотах проверялась нелинейность приемников методом замещения, который обеспечивает высокую точность измерений.

### **Антенная температура**

Выходное напряжение радиометра  $U_i$  (В) можно представить в виде:

$$U_i = k(T_{Ai} + T_{ш}) \cdot \Delta f G_{np} \alpha.$$

Здесь:  $U_i$  – напряжение на выходе детектора (В), индекс  $i$  – либо космос (К), либо Земля (З), либо широкоапертурный излучатель (И);  $T_{Ai}$  – антенная температура;  $k = 1,8 \cdot 10^{-23}$  Дж/град – постоянная Больцмана;  $T_u$  и  $\Delta f$  – шумовая температура (К) и полоса приемника до детектора (Гц);  $G_{np}$  – усиление приемника;  $\alpha$  – чувствительность детектора (В/Вт). В дальнейшем анализе будем предполагать линейность детектора и неизменность  $G_{np}$  и  $T_u$  за период сканирования.

Антенная температура Земли связана с выходной шкалой прибора соотношением

$$T_{Az} = K \cdot N_z + C,$$

где:  $N_i$  – показания, связанные линейным соотношением с  $U_i$  и регистрируемые выходным прибором для случая  $i$ ;  $K = \frac{T_{AI} - T_{AK}}{N_I - N_K}$  и  $C = \frac{T_{AK} N_I - T_{AI} N_K}{N_I - N_K}$  – крутизна шкалы (К/В) и постоянное смещение (К), соответственно. Далее определяются значения  $T_{AI}$  и  $T_{AK}$ , устанавливается влияние на  $T_{AI}$  космоса и платформы космического аппарата (КА), а на  $T_A$  – излучения Земли и платформы КА.

### Антенная температура излучателя

Излучательная способность широкоапертурного излучателя лежит в пределах 0,99–0,995 в соответствии с увеличением частоты. Физическая температура излучателя  $T_{фИ}$  по расчетам, может меняться на витке на 5 К, а сезонное изменение может достигать 35 К (от 311,5 до 346,5 К при номинальной величине 350 К) и контролируется датчиками с погрешностью  $\pm 0,1$  К. Антенная температура излучателя  $T_{AI}$  формируется тремя потоками:

- собственным излучением, приведенным к облучателю;
- отраженным излучателем в сторону рупора излучения приемных устройств;
- излучением окружающей среды.

Учитывая эти три потока, попадающие в апертуру облучателя,  $T_{AI}$  запишется в виде:

$$T_{AI} = T_{фИ} \kappa_I + (1 - \kappa_I)(\beta T_{пр} + (1 - \beta) T_{эф}).$$

Здесь  $T_{фИ}$  – физическая температура излучателя, которая контролируется термодатчиком;  $\beta = \frac{\gamma}{2\pi}$  – угловой коэффициент, учитывающий влияние фона с эффективной температурой  $T_{эф}$ , а  $\gamma$  – телесный угол излучателя;  $\kappa_I$  – излучательная способность излучателя;  $T_{пр}$  – температура излучения приемного устройства, равная температуре статирования  $T_{см}$ ;  $T_{эф}$  – эффективная температура, также близка к температуре статирования  $T_{см}$ . С учетом этого обстоятельства выражение для  $T_{AI}$  примет вид:

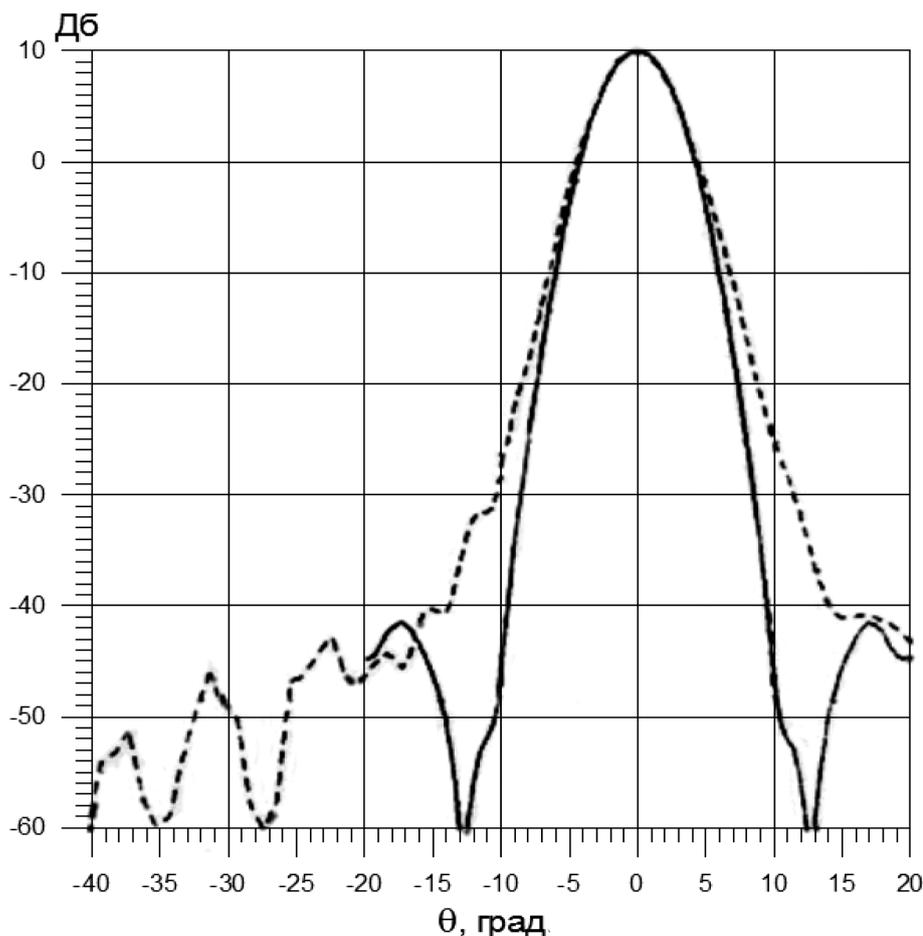
$$T_{AI} = T_{фИ} \kappa_I + T_{см} \cdot (1 - \kappa_I).$$

В свою очередь, согласно тепловым расчетам  $T_{фИ} \approx T_{см}$ , следовательно, и  $T_{AI} = T_{фИ}$ .

## Антенная температура космоса

Каждый облучатель в момент калибровки расположен таким образом, что калибровочное зеркало перекрывает весь конус лучей, отраженных от главного рефлектора. Следует отметить, что калибровочное зеркало при этом находится в промежуточной зоне облучателя (зоне Френеля). Другая особенность состоит в том, что облучатели непрерывно движутся относительно калибровочного зеркала, и нужно рассчитывать, что калибровка для каждого облучателя реально происходит не только в точке, максимально приближенной к фокусу, а в некоторой окрестности этой точки. В связи с вышесказанным, калибровочное зеркало выбрано несколько большего размера, чем требуется по геометрической оптике.

Для примера на *рис. 3* и *4* приведены диаграммы направленности калибровочного зеркала в угломестной и азимутальной плоскостях для частотных диапазонов 36 и 10,6 ГГц. Спутник находится на расстоянии 1000 км от Земли и угол  $\theta_3$ , под которым видна Земля со спутника, равен  $60,8^\circ$ . Угол между осью зеркала калибровки и направлением на край Земли в угломестной плоскости составляет  $-36,5^\circ$ . Земля, таким образом, находится в дальнем боковом и заднем излучении калибровочного зеркала.



*Рис. 3. Диаграмма направленности калибровочного зеркала для частоты 36 ГГц*

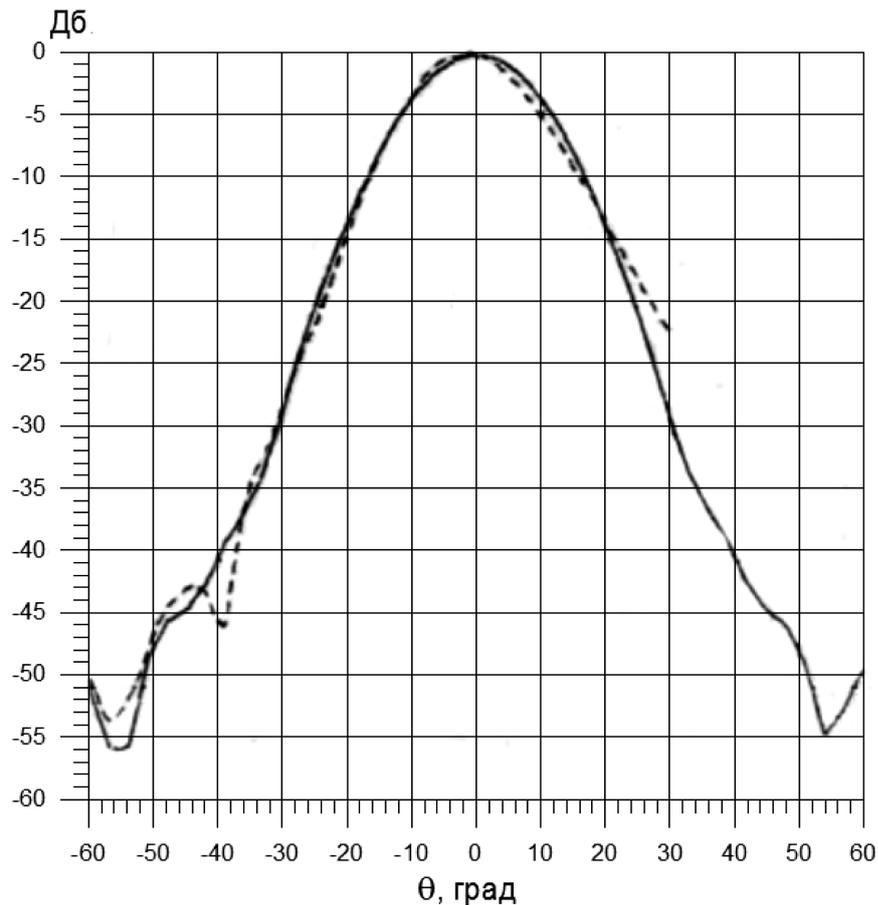


Рис. 4. Диаграмма направленности калибровочного зеркала для частоты 10,6 ГГц

Влияние Земли на антенную температуру оценивалось по формуле

$$T_A = \frac{1}{4\pi} \left[ T_K \int_{4\pi - \Omega_3} P(\Omega) d\Omega + T_3 U \Omega_3 \right],$$

где  $T_3 \approx 270$  К – температура Земли;  $T_K = 2,7$  К – температура космоса;  $\Omega_3 \approx \pi$  – угловой сектор, занимаемый Землей;  $P(\Omega)d\Omega$  – энергия, принимаемая зеркалом в угловом секторе  $d\Omega$ .

Уровень дальнего бокового излучения зеркала калибровки для частоты 36,5 ГГц составляет  $-45 \div -60$  дБ, и значение  $U$  лежит в интервале  $0,001 \div 0,0025$ . Низкий уровень бокового излучения обеспечивается значительным недооблучением зеркала калибровки. Угол между осью облучателя и направлением на кромку зеркала меняется от  $36^\circ$  до  $79^\circ$ . Таким образом, вклад излучения Земли в антенную температуру составляет  $0,08 \div 0,17$  К.

$$T_{AK} = K_K \cdot 2,7,$$

где  $K_K \approx 1,03 \div 1,06$ .

### Яркостная температура

Яркостная температура на вертикальной и горизонтальной поляризациях связана с антенной следующим регрессионным соотношением:

$$\begin{aligned} T_{ЯВ} &= A_{ВВ} \cdot T_{АВ} + A_{ГВ} \cdot T_{АГ} + A_K T_K \\ T_{ЯГ} &= A_{ГГ} \cdot T_{АГ} + A_{ВГ} \cdot T_{АВ} + A_K T_K, \end{aligned}$$

где  $A_{BB}$ ,  $A_{GB}$ ,  $A_{GG}$  и  $A_{BG}$  – коэффициенты антенной матрицы. Для случая рассматриваемой нами антенны

$$\begin{cases} A_{BB} = A_{GG} \approx (1 + K_{\text{Крос}})/(1 - K_{\text{Пер}}) \\ A_{BG} = A_{GB} \approx -K_{\text{Крос}} \cdot (1 + K_{\text{Крос}})/(1 - K_{\text{Пер}}) \\ A_{K} \approx -K_{\text{Пер}}/(1 - K_{\text{Пер}}) \end{cases} .$$

Тогда яркостные температуры могут быть выражены как

$$\begin{aligned} T_{\text{ЯВ}} &= \gamma \left( T_{\text{AB}} - K_{\text{Крос}} \cdot T_{\text{AG}} - \frac{K_{\text{Пер}}}{1 + K_{\text{Крос}}} T_{\text{K}} \right) \\ T_{\text{ЯГ}} &= \gamma \left( T_{\text{AG}} - K_{\text{Крос}} \cdot T_{\text{AB}} - \frac{K_{\text{Пер}}}{1 + K_{\text{Крос}}} T_{\text{K}} \right), \quad \text{где } \gamma = \frac{1 + K_{\text{Пер}}}{1 + K_{\text{Крос}}} . \end{aligned}$$

В случае неполяризованного излучения яркостная температура практически не зависит от уровня кроссполяризации:

$$T_{\text{Я}} = \frac{1}{(1 - K_{\text{Пер}})} \cdot T_{\text{A}} - \frac{K_{\text{Пер}}}{(1 - K_{\text{Пер}})} \cdot T_{\text{K}} .$$

### Заключение

В заключение отметим главную особенность предлагаемого проекта микроволнового сканирующего радиометра – высокие измерительные свойства системы. Это достигается применением однозеркальной смещенной параболы, с помощью которой возможно достичь значений потоковой эффективности не менее 0,97, и системой абсолютной калибровки. Проведенный анализ дает основание полагать, что МРС позволяет из космоса:

- измерять радиояркостные температуры в диапазоне частот 6–220 ГГц с высокой точностью (порядка 1 К) и восстанавливать детальные профили температуры и водяного пара;
- определять вектор приводного ветра;
- восстанавливать интегральные параметры атмосферы и интенсивность осадков.

### Список литературы

1. Волков А.М., Хатин Ю.Б. Микроволновый сканирующий радиометр-поляриметр нового поколения МСР (6,8–89 ГГц). // Получение и использование спутниковых данных о природных ресурсах Земли и окружающей среде: Сб. научных трудов. СПб: Гидрометеоздат, 2004. Вып. 1. С. 33–36.
2. Кузьмин А.В., Поспелов М.Н., Хатин Ю.Б., Шарков Е.А. Микроволновый сканирующий радиометр-поляриметр нового поколения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т. 1. С. 238–243.

3. *Харин Ю.Б., Кузьмин А.В., Семин А.Г., Шарков Е.А.* Микроволновый радиометр-спектрометр с предельными характеристиками для изучения Земли из космоса в диапазоне 6...220 ГГц // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. [в печати]

**On the limit characteristics of satellite radiometer-spectrometer  
in the range of 6...220 GHz**

**Yu.B. Khapin<sup>1</sup>, A.V. Kuzmin<sup>1</sup>, A.G. Semin<sup>2</sup>, A.V. Uteev<sup>1</sup>**

*<sup>1</sup> Space Research Institute of RAS, Moscow, Russia*

*E-mails: yuhapin@gmail.com, kuzmin@asp.iki.rssi.ru, uteev@bk.ru*

*<sup>2</sup> State Pedagogical University, Penza, Russia*

*E-mail: semin@sura.ru*

By satellite microwave radiometers designed for precision radiobrightness polarization measurements, high demands are placed on a number of radio parameters: a high beam antenna efficiency, small side lobe level, cross-polarization, “transfusion”. For the absolute calibration of the radiometer, using the temperature space (2,7 K) and “hot” standard (350 K) is required to minimize the background radiation of the Earth and the platform in the first case and space platforms and in the second case. It also requires high stability low-noise input devices of the gain and noise. Finally, the stability of the parameters of the conical drive – the period and the angular velocity of rotation. This paper deals with the implementation of the ultimate accuracy of absolute measurements of the brightness temperature of the atmosphere-ocean microwave radiometer-spectrometer of the new generation (MRS) operating in the range of 6...220 GHz.

**Keywords:** radiometry, microwave radiometer, brightness temperature, radiometer-spectrometer.