

Оценка характеристик антенной системы МТВЗА-ГЯ, функционирующего на борту КА «Метеор-М» № 2-4

И. Н. Садовский, Д. С. Сазонов

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: Ilya_Nik_Sad@mail.ru

Представлены результаты определения реальных характеристик антенной системы российского сканера/зондировщика МТВЗА-ГЯ (Модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы, ГЯ — в память о Геннадии Яковлевиче Гуськове (1918–2002)), функционирующего в настоящее время на борту космического аппарата «Метеор-М» № 2-4. Исследования основываются на измерениях интенсивности собственного радиотеплового излучения солнечного диска и его окрестностей, выполненных этим прибором 22 и 28 мая 2024 г. В указанные даты космический аппарат выполнял манёвр крена на правый (относительно направления полёта) борт, что привело к возможности наблюдения открытого космоса в части рабочего сектора сканирования прибора. Для нисходящих полувитков при этом выполнялось условие близости мгновенных векторов наблюдения МТВЗА-ГЯ и вектора Солнца (рассчитываемых в инерциальной системе координат). В ходе обработки имеющихся данных для каждого измерения выполнялся перенос вектора Солнца в систему координат, сформированную мгновенной тройкой векторов, определяющих пространственную и поляризационную ориентацию антенны. Далее выполнялся перевод полученных координат в пространство углов, задаваемое геометрией сканирования прибора и максимально приближенное понятию объёмной диаграммы направленности антенны. Завершающая операция нормировки полученных радиотепловых изображений позволяла выделять направление максимума излучения и изолинии уровня половинной мощности. Основной задачей являлось определение взаимной ориентации оптических лучей визирования отдельных частотных каналов сканера/зондировщика, относящихся к разным облучателям антенной системы. Относительно расчётного положения центра солнечного диска они составили: для группы каналов 6,9–23,8 ГГц — $(-0,85^\circ; 0,52^\circ)$; для группы каналов 31,5–48,0 ГГц — $(-1,65^\circ; 0,33^\circ)$; для группы каналов 52,0–91,65 ГГц — $(-1,13^\circ; -0,47^\circ)$ и для каналов 165–183 ГГц — $(0,1^\circ; 0,0^\circ)$. Полученные формы диаграмм направленности практически для всех частот МТВЗА-ГЯ имеют форму эллипса с разной степенью сжатия и ориентацией главной оси. Оценки их ширины (особенно в H -плоскости) превышают значения, полученные разработчиками аппаратуры на основе электродинамического моделирования. При этом результаты модельных оценок ожидаемого отклика МТВЗА-ГЯ при сканировании Солнца, выполненных авторами, служат подтверждением корректности приведённых в статье данных.

Ключевые слова: МТВЗА-ГЯ, «Метеор-М» № 2-4, объёмная диаграмма направленности, ориентация оптических лучей визирования, наблюдения солнечного диска

Одобрена к печати: 19.09.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-100-114

Введение

Невысокое пространственное разрешение микроволновых пассивных средств дистанционного зондирования Земли является одним из основных их недостатков. Проблема заключается в необходимости создания антенной системы с максимально возможным коэффициентом усиления при выполнении требования на отсутствие боковых лепестков диаграммы направленности (ДН). Она усугубляется как самой природой регистрируемых сигналов, так и ограниченным набором технических вариантов реализации подобных систем. Перед разработчиками спутниковых микроволновых сканеров/зондировщиков стоит ещё одна непростая задача — нахождение баланса между разрешением антенной системы и радиометрической чувствительностью всего комплекса. Для обеспечения непрерывного покрытия измерениями при выбранной высоте орбиты сужение главного лепестка ДН требует увеличения скорости сканирования, снижая время накопления сигнала в пределах элемента разрешения. И эта задача должна быть решена оптимальным образом для всего набора привлекаемых частот.

Сканеры/зондировщики серии МТВЗА-ГЯ (Модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы, ГЯ — в память о Геннадии Яковлевиче Гуськове (1918–2002)) являются единственным представителем российского сегмента пассивных микроволновых средств дистанционного зондирования Земли. Ввиду высокой востребованности подобных систем в решении широкого круга научных и прикладных задач глобального и местного характера российское (и не только (Xiao et al., 2024)) научное сообщество внимательно следит за функционированием МТВЗА-ГЯ и поступающей с этого инструмента информацией, оперативно разрабатывая методики её обработки как расширяя перечень готовых продуктов на её основе, так и предлагая новые области её научного применения (см., например, (Ермаков и др., 2021; Заболотских и др., 2022; Пашинов, 2018; Сазонов, 2023; Филей и др., 2021)). И здесь пространственное разрешение часто играет ключевую ограничивающую роль. Ситуация усугубляется настильным углом зондирования МТВЗА-ГЯ (угол встречи с Землёй составляет 65°), что, в сравнении с меньшими значениями соответствующего параметра у приборов-аналогов, приводит к увеличению пространственного элемента разрешения на всех частотных каналах российского инструмента.

Несмотря на важность информации о параметрах антенной системы при решении обратных задач пассивной радиометрии, для МТВЗА-ГЯ она ограничена приведением в литературе лишь сведений общего характера об ожидаемых размерах пятна разрешения на поверхности и пикселя формируемых изображений (Барсуков и др., 2025). Результаты измерений МТВЗА-ГЯ по всем частотным каналам выдаются с единой географической привязкой, без описания технологии совмещения разнесённых по углу лучей визирования (что предполагается в случае применения разнесённых облучателей с единым рефлектором).

Предыдущие работы авторов настоящей публикации по географической привязке измерений приборов МТВЗА-ГЯ, функционировавших и продолжающих работу на космических аппаратах (КА) серии «Метеор-М» с номерами 2-2, 2-3 и 2-4, показали, что оптические оси визирования отдельных частотных каналов всех этих инструментов ориентированы по-разному. Причём отмеченная повторяемость результатов, ожидаемая с учётом переноса оптической схемы антенной системы МТВЗА-ГЯ от версии к версии, позволила приблизительно оценить их угловое расхождение. Вопрос о реальных параметрах ДН на отдельных частотах МТВЗА-ГЯ оставался открытым ввиду отсутствия возможности его решения при штатной ориентации прибора.

Космический аппарат «Метеор-М» № 2-4 периодически меняет свою ориентацию на орбите. При этом в поле зрения МТВЗА-ГЯ попадает область космического пространства и Солнце. Это даёт уникальную возможность определения реальных параметров антенной системы данного инструмента. Описанию процедур, позволивших авторам сделать первичную оценку этих параметров, посвящена содержательная часть настоящей работы.

Общее описание данных

В рамках проведения работ по оценке качества измерений МТВЗА-ГЯ, установленного на КА «Метеор-М» № 2-4, в период с 15 по 31 мая 2024 г. был зафиксирован ряд эпизодов отклонения КА от своей штатной ориентации длительностью от нескольких минут до 2–3 ч. При этом более чем 20 раз были отмечены случаи наблюдения солнечного диска. В рамках настоящей публикации приведён анализ измерений, выполненный прибором 22 мая в 09:21 и 28 мая в 20:41.

Пример радиотепловой картины поверхности Земли, соответствующей одному из полувитков, на котором наблюдался солнечный диск, представлен на *рис. 1* (см. с. 102). На левом изображении, полученном в результате штатной геопривязки измерений МТВЗА-ГЯ, наблюдается чётко выраженная полоса (тёмно-синего цвета), соответствующая регистрации излучения открытого космоса. По её внешнему виду можно с уверенностью сказать, что прибор (спутник) имеет значительный крен на правый (относительно направления полёта) борт. При этом радиометрический портрет солнечного диска виден в районе восточнее Японских

островов и имеет вид существенно вытянутого эллипса, наблюдаемого более чем на 30 последовательных сканах.

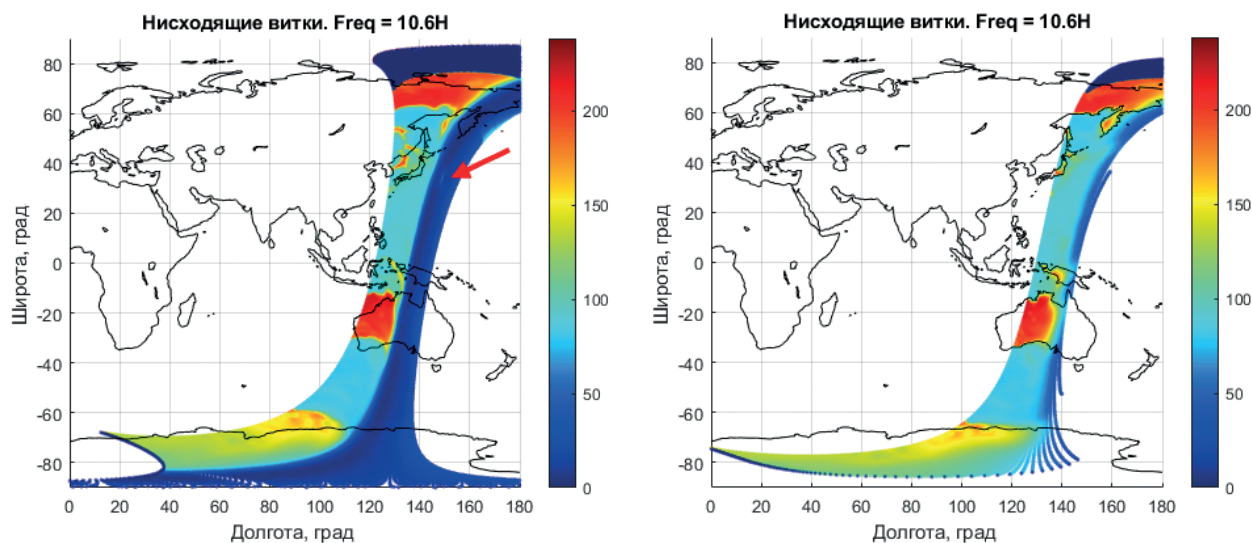


Рис. 1. Результаты географической привязки данных измерений МТВЗА-ГЯ, выполненные без корректирующих углов (слева) и с их учётом (справа)

Очевидно, что для решения основной задачи представляемой работы требуется наличие информации о точных параметрах манёвра, выполняемого КА. Эта информация как по частоте, так и по длительности манёвров недоступна для анализируемого временного периода. Невозможно было использовать и информацию со звёздных датчиков, установленных на спутнике, поскольку на период маневрирования они отключались с сохранением последнего значения.

Авторы выполнили подбор приблизительных корректирующих углов на основе операции визуального совмещения географической береговой линии и поля распределения радиояростной температуры (Садовский, Сазонов, 2023). Наилучший результат удалось получить при угле крена $+25^\circ$, тангажа -1° , рыскания $+5^\circ$ (правое изображение на рис. 1). Эти значения были использованы при проведении всех последующих расчётов.

Для подтверждения корректности подобранных углов ориентации МТВЗА-ГЯ на орбите, а также того факта, что попавший в поле зрения прибора объект является Солнцем, была проведена операция расчёта углового расстояния между мгновенными векторами наблюдения \vec{k} , формируемыми МТВЗА-ГЯ в каждый момент времени (Садовский, Сазонов, 2022), и вектором Солнца \vec{S} в геоцентрической инерциальной системе координат (ИСК). Вектор Солнца в пределах рассматриваемого полувитка можно считать постоянным, а его координаты определить в соответствии с моделью SGP4 (англ. Simplified General Perturbations). Эта операция была выполнена для обоих полувитков:

$$\vec{S} = [0,4674 \quad 0,8623 \quad 0,1950] \text{ (09:21, 22 мая 2024 г.)},$$

$$\vec{S} = [0,4549 \quad 0,8371 \quad 0,3040] \text{ (20:41, 28 мая 2024 г.)}.$$

Результаты оценки углового расстояния между указанными векторами представлены на рис. 2 (см. с. 103). Используются координаты «пиксель/скан». На этом же рисунке приведены результаты измерений яркости, полученные прибором для этих же координат.

Сопоставление двух изображений, представленных на рис. 2, позволяет сделать следующие выводы: во-первых, наблюдаемый локальный рост яркости действительно соответствует наблюдению солнечного диска; во-вторых, имеются незначительные отклонения положения точек совпадения векторов \vec{k} и \vec{S} (на левом изображении) и максимума яркости излучения

(на правом). Последний факт требует дополнительного рассмотрения, поскольку может как отражать реальную картину смещения лучей визирования прибора от ожидаемых направлений, так и говорить о необходимости корректировки всего алгоритма географической привязки МТВЗА-ГЯ, работающего корректно в отсутствии наклона оси вращения прибора в орбитальной системе координат и дающего ошибки в случае маневрирования носителя.

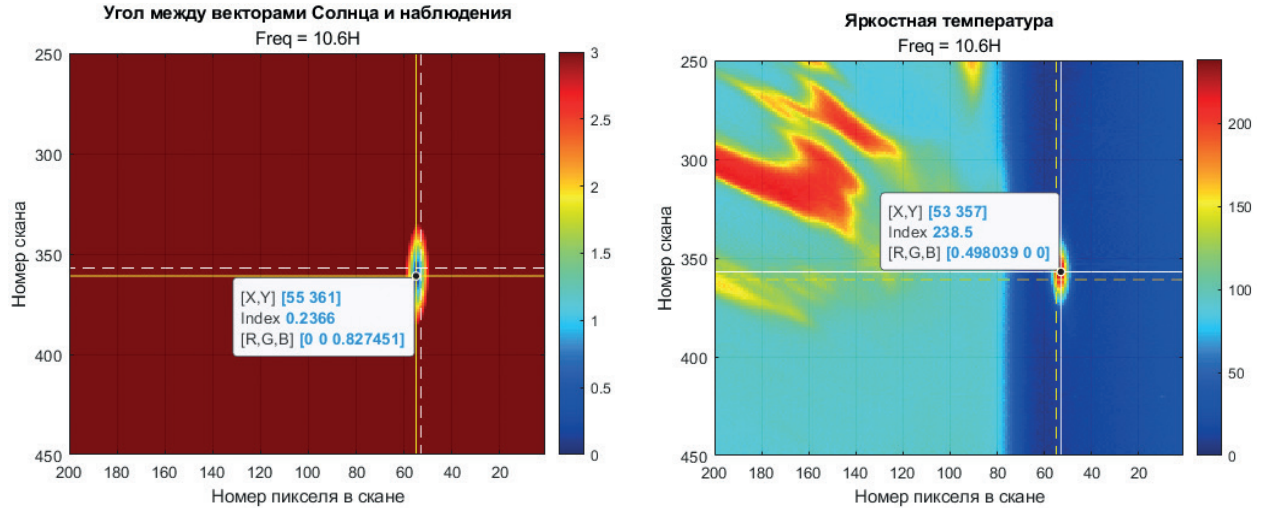


Рис. 2. Оценка углового смещения между мгновенными векторами наблюдения МТВЗА-ГЯ и расчётным положением Солнца (слева) и соответствующее распределение яркости вблизи солнечного диска (справа)

Процедура аппаратного сведения лучей в МТВЗА

Для правильного понимания и трактовки результатов работы, представленных ниже, требует рассмотрения общая конструкция антенной системы МТВЗА-ГЯ, а также принцип формирования радиотепловых изображений.

Антенная система МТВЗА-ГЯ, установленного на борту КА «Метеор-М» № 2-4, представляет собой однозеркальную антенну с боковым облучением параболического зеркала размером 0,65 м. Групповой многочастотный антенный облучатель включает пять отдельных рупоров, каждый из которых оптимизирован в диапазоне 6,9–23,8; 31,5–48,0; 52,8–91,65 и 165–183 (основной и резервный) ГГц (рис. 3, см. с. 104).

Оптические оси антенных лучей радиометрических каналов ориентированы таким образом, что они являются образующими конуса сканирования с углом при вершине 53,3°. В табл. 1 приведено угловое смещение отдельных облучателей относительно фокальной плоскости антенны (информация предоставлена разработчиками аппаратуры). Второй столбец таблицы заполняется на основе расчётных характеристик антенной системы, третий — на базе испытаний лётного образца прибора.

Таблица 1. Параметры угловой ориентации лучей визирования МТВЗА-ГЯ, соответствующих различным частотным каналам

Частотные каналы, ГГц	Ожидаемое отклонение, град	Корректировка, количество элементов скана
6,9–23,8	+17	+12
165–183 (основной)	+6	+5
52,8–91,65	0	0
165–183 (резервный)	–8,75	–8
31,5–48,0	–15	–9

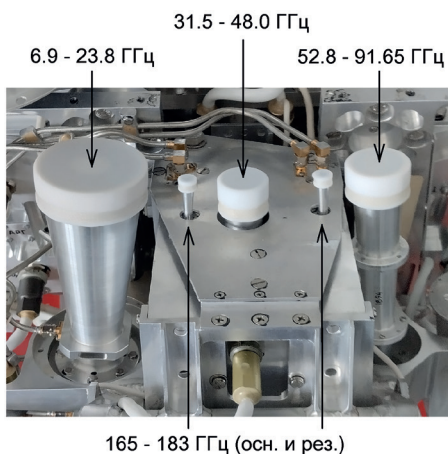


Рис. 3. Расположение облучателей антенной системы МТВЗА-ГЯ

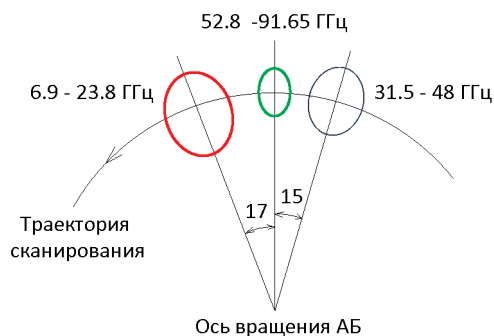


Рис. 4. Схема реального расположения лучей визирования разных частотных каналов МТВЗА-ГЯ. АБ — антенный блок

Имеющееся угловое расхождение приводит к тому, что частотные каналы, отнесённые к разным облучателям, в фиксированный момент времени направлены в разные стороны (рис. 4). Решение большинства обратных задач пассивной радиометрии базируется на предположении о наличии синхронных многочастотных наблюдений выделенного элемента земной поверхности. Таким образом, имеющиеся расхождения (пространственные и временные) между лучами визирования требуется устранять.

Принцип действия аппаратного совмещения антенных лучей, реализованный в МТВЗА-ГЯ, состоит в следующем: результаты измерений, поступающие со всех частотных каналов, постоянно записываются в буфер памяти блока предварительной обработки данных. С учётом направления вращения антенного блока и расположения групповых облучателей первыми для выделенной точки пространства получаются данные с частот 6,9–23,8 ГГц (в момент времени t_1), далее следуют данные с рабочих каналов 165–183 ГГц (t_2), 52,8–91,65 ГГц (t_3), 165–183 ГГц (резервные) (t_4) и 31,5–48,0 ГГц (t_5). При этом сдвиг по времени между t_i может быть оценён на основе информации из табл. 1, скорости вращения антенного блока МТВЗА-ГЯ (144 град/с) и времени квантования отдельного измерения (0,00506 с). Например, относительно незатронутых преобразованиями измерений на частотах 52,8–91,65 ГГц временное смещение для каналов 6,9–23,8 ГГц составляет:

$$\Delta_{13} = +17/144 + 12 \times 0,00506 \approx 0,17876 \text{ с,}$$

а соответствующее смещение в пикселях:

$$\Delta_{13} = \frac{+17/144}{0,00506} + 12 \approx 35 \text{ пикселей.}$$

Таким образом, при известных значениях задержек Δ_i можно выбирать из непрерывных потоков измерений на различных частотных каналах (для разных облучателей) те моменты времени, при которых наблюдается одна и та же область пространства. Эта технология отработана конструкторами МТВЗА-ГЯ и обеспечивает на поверхности Земли достаточно чёткое совмещение лучей визирования.

При рассматриваемых наблюдениях солнечного диска отличие состоит в том, что перемещение прибора по орбите медленно изменяет взаимное расположение оси вращения антенного блока МТВЗА-ГЯ относительно объекта наблюдения. У этого эффекта есть как минимум два очевидных последствия. Во-первых, каждый раз меняется угловое расстояние, которое требуется пройти антенному блоку от условной начальной точки рабочего сектора до оси симметрии солнечного диска (которая меняется от скана к скану). Во-вторых, в отличие от наземных измерений, траектории луча визирования соседних сканов по оптическому диску (как и по всему небосводу) оказываются не параллельными. Возникающая слоистость радиотепловых портретов должна автоматически учитываться при использовании векторных

преобразований и переносе всех сканов в единую систему координат, как это будет продемонстрировано ниже.

Понимание описанной процедуры реализации аппаратного сведения лучей визирования отдельных частотных каналов МТВЗА-ГЯ в совокупности с представленной оптической схемой антенной системы позволяет сформулировать следующие положения:

- реальные лучи визирования отдельных частотных каналов МТВЗА-ГЯ имеют разную ориентацию;
- функция сведения лучей визирования в азимутальной плоскости реализована аппаратно и не подлежит корректировке после введения прибора в эксплуатацию;
- точность операции аппаратного сведения лучей визирования определяется качеством наземных испытаний прибора в условиях ограничений размерами безэховой камеры и конечными размерами эталонного источника излучения;
- корректировка углового отклонения лучей визирования от образующей конуса сканирования (или оси вращения прибора) — не предусмотрена;
- при необходимости существует возможность восстановления истинной картины излучения, регистрируемого прибором до операции сведения, что даёт потенциальную возможность построения общей (многочастотной) ДН прибора и оценки её параметров.

Варианты определения взаимного расположения Солнца и приёмной антенны

Общая оценка углового расстояния между векторами \vec{k} и \vec{S} , выполняемая по соотношению $\alpha_{abs} = \arccos(\vec{k} \cdot \vec{S})$ и представленная на *рис. 2*, имеет косвенное отношение к понятию объёмной ДН антенны (существует бесконечное количество векторов \vec{k} , равноудалённых от источника излучения \vec{S}). Соответственно, для решения поставленной задачи требуется однозначное определение взаимного расположения пар этих векторов. Поскольку объёмная ДН оперирует такими понятиями, как «ширина в плоскости векторов электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} поля», очевидным является выбор системы координат, образованной тройкой ортогональных векторов \vec{k} , \vec{k}_E и \vec{k}_H (в данной постановке — вектора Пойнтинга, векторов напряжённости электрического и магнитного полей приёмной антенны), определяющей не только направление визирования прибора, но и его поляризационную ориентацию. Координаты векторов \vec{k}_E и \vec{k}_H могут быть рассчитаны через векторы оси вращения прибора \vec{O}_{rot} и наблюдения \vec{k} : $\vec{k}_H = \vec{k} \times \vec{O}_{rot}$, $\vec{k}_E = \vec{k}_H \times \vec{k}$ (в ИСК). Введение указанной системы координат требует для каждого момента времени (каждого пикселя имеющегося радиометрического изображения) расчёта координат тройки векторов \vec{k} , \vec{k}_E и \vec{k}_H (в ИСК) с последующим переносом в эту систему вектора Солнца \vec{S} : $\vec{S}' = [\vec{k} \cdot \vec{S} \quad \vec{k}_H \cdot \vec{S} \quad \vec{k}_E \cdot \vec{S}]$.

Данный перенос, по сути, фиксирует исследуемую антенну в пространстве, а Солнце выступает в роли перемещающегося источника стабильного опорного сигнала. Отклик радиометра на это перемещение можно рассматривать в качестве объёмной ДН антенны. Последняя оперирует понятиями угла места θ и азимута φ (угловых смещений в плоскостях векторов \vec{E} и \vec{H} исследуемой антенны), и, как продемонстрировано на левом изображении *рис. 5* (см. с. 106) (приведено две пары углов θ и φ), выбор способа их (углов) оценки будет влиять на абсолютные величины угловых смещений.

При измерениях характеристик антенных систем в наземных условиях должны выполняться несколько базовых принципов: обеспечение равной интенсивности излучения в точке приёма (постоянство расстояния между приёмником и передатчиком, стабильность источника излучения), а также условия поляризационной ориентации — вектор Пойнтинга эталонной антенны $\vec{P}_{ЭТ}$ направлен в точку расположения исследуемой, вектора $\vec{E}_{ИССЛ}$, $\vec{E}_{ЭТ}$ и $\vec{P}_{ЭТ}$ лежат в одной плоскости. С этой точки зрения понятию объёмной ДН соответствует именно пара углов (θ_1, φ_1) , представленных на *рис. 5*. Однако и в этом случае будут возникать сложности с интерпретацией получаемых результатов, требующие обсуждения.

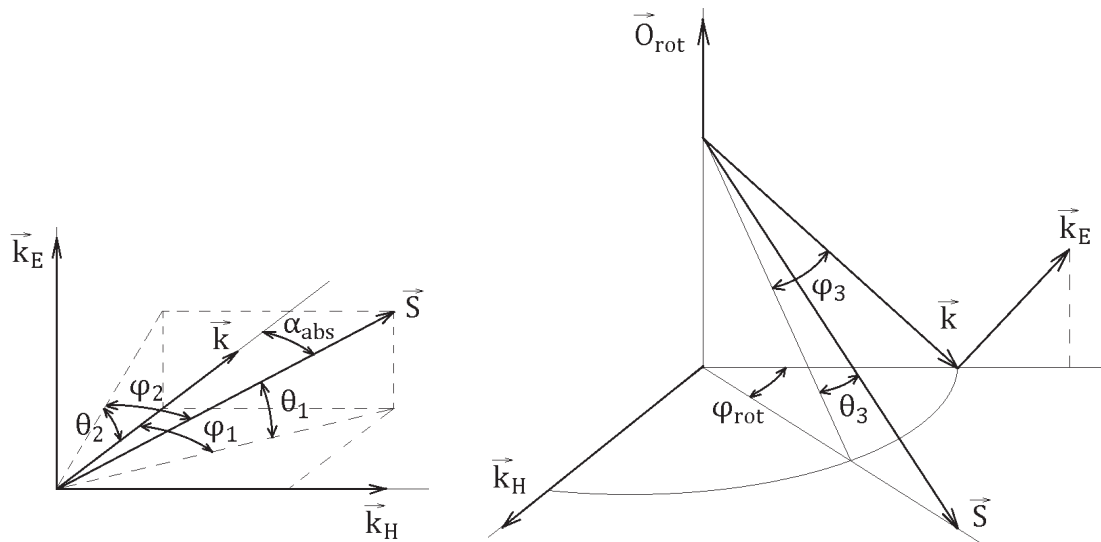


Рис. 5. К вопросу определения взаимной ориентации векторов \vec{k} и \vec{S} . Общее угловое смещение α_{abs} и пары углов (θ_1, φ_1) и (θ_2, φ_2) (слева). Углы (θ_3, φ_3) , учитывающие геометрию сканирования МТВЗА-ГЯ (справа)

Характерными особенностями конического сканирования являются: постоянство угла между направлением визирования \vec{k} и осью вращения \vec{O}_{rot} ($53,3^\circ$); векторы \vec{k} , \vec{k}_E и \vec{O}_{rot} всегда лежат в одной плоскости. В результате вектор \vec{k}_E всегда перпендикулярен траектории сканирования прибора. То есть для Солнца, имеющего конкретные угловые размеры, и с учётом изменения ориентации прибора в пространстве имеется потенциальная возможность наблюдения одного и того же элемента солнечного диска, но полученного на разных сканах, при разных траекториях сканирования и, соответственно, при разной ориентации вектора \vec{k}_E приёмной антенны. Соответственно, несмотря на малые угловые размеры Солнца и неполяризованность его излучения, требуется в каком-либо виде определение его ориентации относительно плоскости наблюдения прибора. Это можно сделать, введя понятие «плоскости наблюдения центра солнечного диска», образованной векторами оси вращения прибора \vec{O}_{rot} и вектором Солнца \vec{S} . Ещё одна проблема использования углов (θ_1, φ_1) заключается в том, что при их оценке используется понятие проекции на плоскость. Очевидно, что в непосредственной близости от вектора \vec{k} отличием реально пройденного вектором Солнца углового расстояния (определяемого траекторией сканирования луча) от их проекционных оценок можно пренебречь. Однако уже было продемонстрировано, что ожидаемое место расположения Солнца и наблюдаемое в реальности — различаются. Плюс, регистрация излучения от Солнца происходит на достаточно больших расстояниях от центра его оптического диска. Всё это при выборе координат (θ_1, φ_1) будет приводить к искусственным геометрическим искажениям формы рассчитываемых объёмных ДН.

По мнению авторов настоящей работы, наиболее оптимальной следует считать схему определения взаимного расположения векторов \vec{k} и \vec{S} , представленную в правой части рис. 5. А именно: φ_{rot} — угол между плоскостью наблюдения прибора и плоскостью наблюдения центра солнечного диска; θ_3 — угол между вектором Солнца \vec{S} и вектором наблюдения \vec{k} после совмещения плоскости наблюдения и плоскости наблюдения центра солнечного диска за счёт поворота вокруг оси \vec{O}_{rot} на угол φ_{rot} . При этом реальное угловое расстояние φ_3 , пройденное вектором \vec{k} до плоскости наблюдения центра солнечного диска, оказывается меньше φ_{rot} и может быть рассчитано исходя из геометрии сканирования МТВЗА-ГЯ:

$$\varphi_3 = 2 \arcsin \left[\sin \frac{\varphi_{rot}}{2} \cdot \frac{1}{\operatorname{tg}(53,3)} \right].$$

Построенное в координатах (θ_3, φ_3) поле распределения яркостной температуры, после соответствующей нормировки, максимально соответствуют понятию объёмной ДН антенной системы и может использоваться для анализа её характеристик.

Обработка экспериментальных данных

Ниже на примере частотного канала 10,6 ГГц (Н) приведена последовательность операций, позволяющая построить его объёмную ДН на основе сканирования солнечного диска и его окрестностей, а также определить её основные параметры — ширину ДН по уровню половинной мощности в двух ортогональных плоскостях $(\Delta\theta_E^{exp}$ и $\Delta\theta_H^{exp})$ и ориентацию её максимума $(\varphi_{max}, \theta_{max})$.

Первым шагом обработки становится визуальный анализ полувитков, для которых выполнена штатная операция геопривязки. По геопривязанным радиотепловым изображениям выявляется как присутствие на нём наблюдений Солнца, так и соответствие выполняемого носителем манёвра 25° крену на правый борт.

Далее осуществляется географическая привязка измерений с учётом оговорённых выше корректирующих углов крена $(+25^\circ)$, тангажа (-1°) и рыскания $(+5^\circ)$ и проводится проверка корректности её выполнения, свидетельствующая о том, что рассчитанные в ходе геопривязки мгновенные векторы могут быть использованы в дальнейших вычислениях.

Наличие координат вектора \vec{S} позволяет рассчитать угловое отклонение каждого вектора \vec{k} от центра Солнца и построить пары изображений, приведённых на *рис. 2*. Они позволяют оценить близость расположения радиотеплового изображения Солнца (53; 357) и теоретически ожидаемого максимума излучения (55; 361) (их координаты выделены на рисунке сплошными и штриховыми линиями), определить минимальное угловое расстояние между центром оптического диска Солнца и ближайшего вектора наблюдения $(0,2366^\circ)$, зафиксировать максимальное значение яркости (238,5 К).

Далее для каждого элемента (пикселя) радиотеплового изображения, характеризуемого вектором \vec{k} , выполняются (в соответствии с технологией, описанной в разд. «Варианты определения взаимного расположения Солнца и приёмной антенны»): расчёт координат векторов \vec{k}_E и \vec{k}_H (в ИСК); перенос вектора \vec{S} в систему координат, образованную тройкой векторов \vec{k} , \vec{k}_E и \vec{k}_H ; определение плоскости наблюдения центра солнечного диска для данного скана; расчёт значений пары углов (θ_3, φ_3) . Результаты измерений яркостной температуры в окрестности солнечного диска в координатах (θ_3, φ_3) приведены на *рис. 6*.

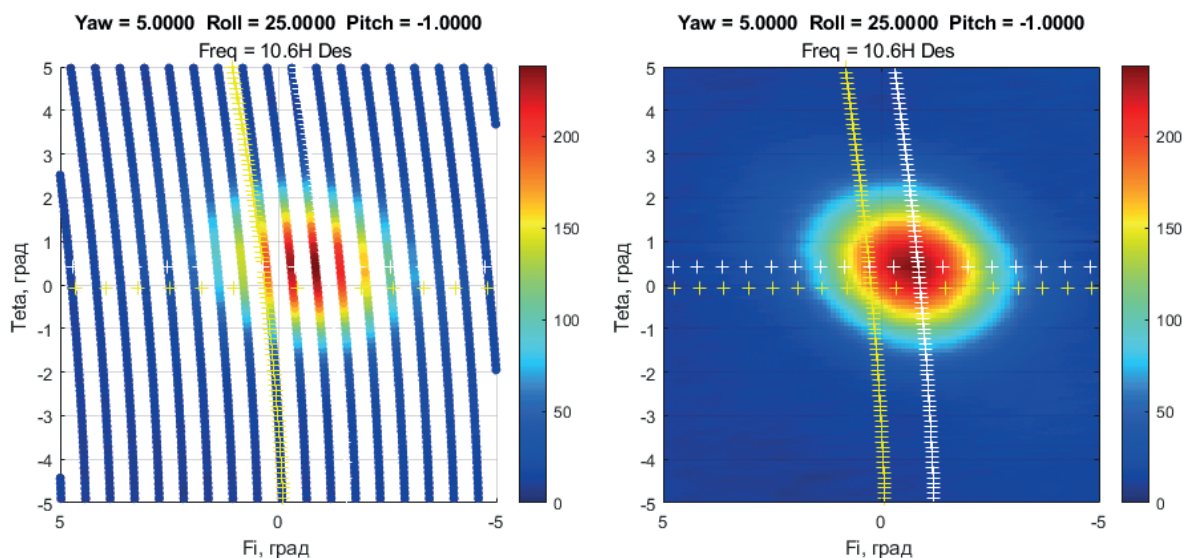


Рис. 6. Результаты наблюдений солнечного диска в координатах антенной системы МТВЗА-ГЯ. Комментарии даны в тексте

Левая часть рисунка представляет собой массив дискретных точек, расположение которых соответствует ориентации мгновенных векторов наблюдения МТВЗА-ГЯ. В правой части приведены результаты его интерполяции на регулярную угловую сетку с размерами ячейки $0,1 \times 0,1^\circ$. Жёлтые крестики обозначают линии постоянных значений номеров сканов и пикселей, для которых на *рис. 2* было зафиксировано минимальное угловое расхождение векторов \vec{k} и \vec{S} . Белые крестики соответствуют положению максимума зарегистрированного излучения на *рис. 2*. Эти пары линий демонстрируют эффект изменения углового расстояния между начальной точкой рабочего сектора сканирования МТВЗА-ГЯ до плоскости наблюдения центра оптического диска Солнца. Также можно оценить и разное реальное угловое разрешение (частота следования точек) по углам θ и φ , определяемое как характеристиками сканирования прибора, так и его перемещением по орбите.

На последнем этапе обработки интерполированные изображения нормировались с последующим выделением изолинии, соответствующей уровню половинной мощности регистрируемого излучения на анализируемом частотном канале. Также определялись координаты точки, в которой нормированная функция принимала значение, равное 1 (результаты выполнения этих операций для всех частотных каналов будут приведены ниже).

Результаты обработки

Таблица 2. Результаты оценки параметров антенной системы МТВЗА-ГЯ (КА «Метеор-М» № 2-4)

Частота, ГГц	$T_{br_max}^{exp}$, К	$\Delta\theta_H^{exp}$, град	$\Delta\theta_E^{exp}$, град	Φ_{max} , град	θ_{max} , град	$\Delta\theta_H^{th}$, град	$\Delta\theta_E^{th}$, град
<i>Горизонтальная поляризация</i>							
6,90	170,24	4,15	4,20	-0,7	0,3	4,20	4,21
7,30	179,01	4,45	4,00	-0,7	0,4	—	—
10,60	267,13	3,40	2,70	-0,7	0,5	2,76	2,85
18,70	360,54	2,60	2,00	-0,7	0,8	1,64	1,82
23,80	350,18	2,35	1,75	-0,7	0,5	1,37	1,48
31,50	440,23	2,15	1,40	-1,8	0,4	0,94	0,99
36,70	489,19	2,05	1,40	-1,3	0,3	0,82	0,88
42,00	576,77	1,90	1,35	-1,8	0,4	0,73	0,81
45,00	644,80	1,80	1,25	-1,8	0,4	—	—
48,00	709,24	1,70	1,15	-1,8	0,4	0,65	0,76
91,65	864,66	1,60	1,00	-1,3	-0,5	0,40	0,45
<i>Вертикальная поляризация</i>							
6,90	165,39	4,40	4,05	-1,2	0,4	4,21	4,22
7,30	183,06	4,25	3,95	-1,2	0,2	—	—
10,60	251,43	3,35	2,85	-0,7	0,5	2,77	2,83
18,70	331,87	2,65	2,10	-1,2	0,8	1,65	1,81
23,80	342,32	2,35	2,05	-0,7	0,8	1,37	1,48
31,50	433,74	2,45	1,30	-1,3	0,2	0,94	0,99
36,70	468,18	2,50	1,25	-1,3	0,3	0,82	0,88
42,00	592,58	2,20	1,05	-1,8	0,4	0,73	0,80
45,00	694,90	2,00	0,95	-1,8	0,2	—	—
48,00	669,46	2,10	1,00	-1,8	0,3	0,66	0,75
52,00	467,23	2,25	1,35	-0,8	-0,4	0,57	0,62
91,65	915,13	1,75	0,85	-1,3	-0,5	0,40	0,45
165,00	274,43	2,40	1,55	0,3	0	—	—
183,00	271,77	2,40	1,60	-0,1	0	0,24	0,37

Описанная последовательность обработки результатов измерений была выполнена для большинства частотных каналов МТВЗА-ГЯ, полный перечень которых, как и оценки параметров полученных ДН, приведены в *табл. 2*. В ней представлены результаты, полученные на основе измерений, выполненных прибором 22 мая 2024 г. Последние два столбца таблицы заполнены на основе конструкторской документации, предоставленной разработчиками аппаратуры.

В графическом виде результаты проведённых исследований приведены на серии изображений *рис. 7*. Совместный анализ результатов количественных оценок и формы полученных изолиний позволяет сделать следующие выводы:

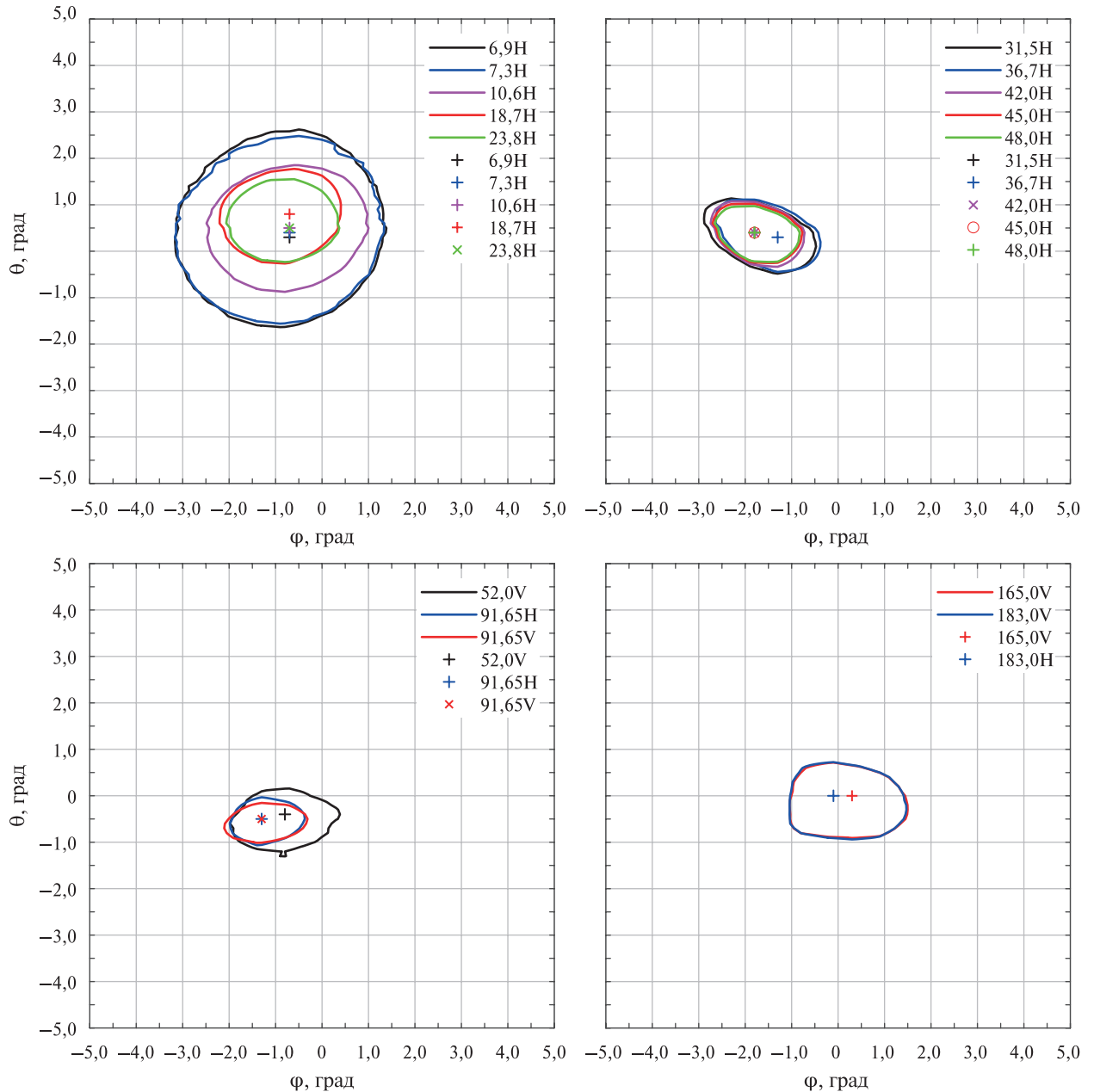


Рис. 7. Уровни половинной мощности регистрируемого излучения Солнца на основных частотных каналах МТВЗА-ГЯ (сплошные линии). Знаки соответствуют координатам максимума яркости

Частотные каналы 6,9 и 7,9 ГГц имеют практически осесимметричную ДН. Начиная с 10,6 ГГц изолиния половинной мощности может быть описана уравнением эллипса, причём рост частоты сопровождается увеличением коэффициента его сжатия.

Для частотных каналов, относящихся к рупорам, которые смещены относительно фокальной плоскости на значительный угол (см. табл. 1), присутствует наклон главной оси эллипса. Ввиду существенных значений $\Delta\theta_H^{exp}$ и $\Delta\theta_E^{exp}$ это не так заметно на частотах 6,9–23,8 ГГц, однако чётко прослеживается в диапазоне 31,5–48,0 ГГц.

Измеренные показатели $\Delta\theta_H^{exp}$ и $\Delta\theta_E^{exp}$ в целом соответствуют положению обратной зависимости от частоты при сохранении размеров апертуры антенной системы. Однако эта зависимость оказывается далеко не линейной.

Для канала 6,9 ГГц показатели $\Delta\theta_H^{exp}$ и $\Delta\theta_E^{exp}$ находятся в допустимом 10%-м интервале относительно ожидаемых значений $\Delta\theta_E^{th}$ и $\Delta\theta_H^{th}$.

Для всех остальных частот экспериментально измеренные $\Delta\theta_H^{exp}$ и $\Delta\theta_E^{exp}$ превышают ожидаемые значения этих показателей. Причём разница в H -плоскости (для азимутального угла сканирования) существенно больше расхождения $\Delta\theta_E^{exp}$ и $\Delta\theta_H^{th}$.

Координаты центров симметрии экспериментально определённых ДН, как правило, не совпадают с расположением максимумов регистрируемого излучения.

Вариации расположения максимумов регистрируемого излучения для частотных каналов, объединённых одним облучателем, могут достигать значений $0,5^\circ$ в H -плоскости (угол φ) и $0,6^\circ$ в E -плоскости (угол θ). При этом наблюдается поляризационная зависимость результатов оценок.

Следует отметить, что обработка измерений МТВЗА-ГЯ за 28 мая 2024 г. дала практически идентичные результаты как по общему характеру наблюдаемых эффектов, так и в численных оценках.

Оценка интенсивности солнечного излучения

Расчёт интенсивности излучения Солнца на рабочих частотах (длинах волн λ) МТВЗА-ГЯ можно выполнить в соответствии с работой (Топчило, 2021):

$$T_{br}(\lambda) = 5560 + 2067(\log_{10} \lambda) + 1067(\log_{10} \lambda)^2.$$

Результаты оценок интенсивности излучения, полученные в рамках представленного соотношения, приведены на рис. 8. С учётом существенной (по астрономическим меркам) ширины ДН частотных каналов МТВЗА-ГЯ в рамках решаемой в статье задачи излучение солнечного диска можно считать равномерным по всей его площади. Также можно пренебречь эффектом увеличения размера солнечного диска, приобретающим значимость на длинах волн более 30 см, и считать его постоянным, равным $0,5^\circ$.

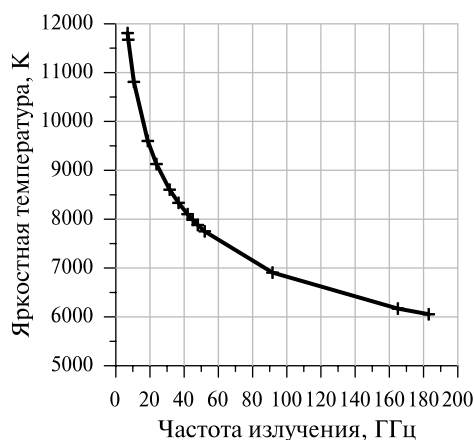


Рис. 8. Интенсивность излучения солнечного диска на рабочих частотах МТВЗА-ГЯ

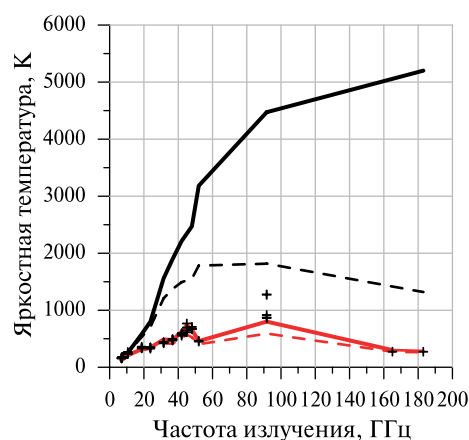


Рис. 9. Модельные оценки вариаций отклика МТВЗА-ГЯ, вызванные дискретностью азимутального угла. Пояснения даны в тексте

При наличии информации о ширине ДН антенны радиометра в E - и H -плоскостях можно выполнить модельные оценки ожидаемого отклика прибора при сканировании области космического пространства в окрестности солнечного диска. При этом (для интерпретации результатов исследования) интерес представляет не только уменьшение интенсивности регистрируемого радиометрическим приёмником сигнала (по сравнению с ожидаемым (см. рис. 8)), вызванное эффектом пространственной свёртки с областями «холодного космоса» (2,73 К), даже при совпадении ориентации векторов наблюдения \vec{k} и \vec{S} , но и оценки вариаций яркости, обусловленные как ошибкой ориентации прибора в пространстве, так и конечным угловым шагом измерений МТВЗА-ГЯ. Ранее было показано, что шаг квантования по азимутальному углу вращения сканера, переведённый в углы ДН антенны (в H -плоскости), составляет порядка $0,5619^\circ$. Таким образом, максимальная ошибка отклонения векторов \vec{k} и \vec{S} не может превышать $0,28^\circ$, поскольку в рамках рассматриваемой геометрии угловой шаг E -плоскости оказывается существенно меньше, а превышение $0,28^\circ$ в H -плоскости переводит максимальную яркость в соседний пиксель скана.

На рис. 9 представлены результаты модельных оценок максимальной яркости $T_{br_max}^{th}$ для рабочих частот МТВЗА-ГЯ. Сплошные линии соответствуют случаю, когда векторы \vec{k} и \vec{S} совпадают, штриховые — угол (φ) между ними в плоскости сканирования (E -плоскость) составляет $0,28^\circ$. Таким образом, при неизвестной величине φ измеряемые прибором значения должны лежать в пределах указанного коридора. Чёрный цвет на представленных зависимостях соответствует результатам, полученным с использованием значений $\Delta\theta_H^{th}$ и $\Delta\theta_E^{th}$ из табл. 2, красный — $\Delta\theta_H^{exp}$ и $\Delta\theta_E^{exp}$. В обоих случаях модельные ДН имели вид распределения Гаусса. Как и следовало ожидать, расхождения векторов \vec{k} и \vec{S} практически не затрагивают значения максимума яркости для каналов, ширина ДН которых существенно превышает $0,28^\circ$. Максимальное влияние ошибки позиционирования должны оказывать на показания в канале 183 ГГц (исходя из соотношения его $\Delta\theta_H^{th}$, $\Delta\theta_E^{th}$ и углового размера Солнца). Помимо этого, тот факт, что большую часть луча визирования этих каналов «занимает» космическое пространство, приводит к снижению регистрируемых $T_{br_max}^{th}$, несмотря на имеющийся рост интенсивности излучения самого Солнца. Результаты аналогичных оценок для смещения по углу θ (E -плоскость) не приводятся ввиду малости соответствующих значений.

Чёрные крестики на рис. 9 — максимальные значения яркости, зафиксированные прибором на всех частотах и поляризациях за два рассмотренных эпизода наблюдения солнечного диска 22 мая (табл. 2) и 28 мая 2024 г. Очевидно, что их расположение гораздо лучше описывается модельными кривыми, полученными для $\Delta\theta_H^{exp}$ и $\Delta\theta_E^{exp}$, а не заявленными значениями $\Delta\theta_H^{th}$ и $\Delta\theta_E^{th}$. Единственным исключением является результат, зафиксированный на горизонтальной поляризации на частоте 91,65 ГГц (1275,35 К), когда проводилась реконструкция показаний прибора, искажённых ввиду ограничения памяти, выделяемой под хранение данных измерений.

Приведённые результаты являются косвенным доказательством корректности экспериментальных оценок параметров $\Delta\theta_H^{exp}$ и $\Delta\theta_E^{exp}$ по описанной в настоящей статье технологии и представленных в табл. 2.

Заключение

Манёвры, периодически выполняемые КА «Метеор-М» № 2-4, предоставляют уникальную возможность исследования технических характеристик микроволнового сканера/зондировщика МТВЗА-ГЯ. Наблюдения солнечного диска, имеющего малые угловые размеры и высокую контрастность на фоне реликтового излучения, позволяют исследовать форму реальных ДН антенной системы данного инструмента с точностью, недоступной в наземных условиях.

В рамках выполненных исследований удалось достичь основной цели, которую авторы ставили перед собой, — определить реальную ориентацию оптических лучей визирования всех частотных каналов МТВЗА-ГЯ. Эта информация будет использована при решении

задачи географической привязки измерений данного инструмента. Важно, что для «атмосферных» каналов МТВЗА-ГЯ эта процедура будет реализована впервые.

Результаты восстановления реальных характеристик ДН отдельных частотных каналов МТВЗА-ГЯ свидетельствуют об их расхождении с запланированными. Одним из подтверждений корректности выполненных оценок являются результаты моделирования излучения Солнца и отклика частотных каналов прибора, приведённые в тексте. При этом авторы не исключают возможности их частичного расхождения с реальными ввиду особенностей как технической реализации МТВЗА-ГЯ, так и работы с интенсивным излучением Солнца. Детальное описание всех возникших вопросов нельзя уместить в материалы одной публикации, поэтому ограничимся лишь их перечислением: существенное угловое расстояние (в рамках рассматриваемой задачи) между соседними элементами одного скана МТВЗА-ГЯ; ограничения на формат хранения результатов измерений, приводящее к переполнению через верхнюю границу представления для интенсивных источников излучения и, как следствие, неоднозначности их последующей реконструкции; возможная нелинейность характеристик приёмников при наблюдениях Солнца; периодический рост помех в отдельных частотных каналах.

Выявленные расхождения параметров антенной системы свидетельствуют о необходимости внесения корректировок создателями аппаратуры в процессы разработки, изготовления, сборки и проводимых испытаний антенной системы будущих версий прибора, а также о том, что требуется привлечение более аккуратных методик обработки данных МТВЗА-ГЯ для поддержания общего высокого уровня информативности продуктов, получаемых на их основе.

Работа выполнена при поддержке темы «Мониторинг» (госрегистрация № 122042500031-8). Авторы выражают благодарность: А. М. Стрельцову (АО «Российские космические системы») за своевременное и оперативное предоставление предобработанных данных измерений МТВЗА-ГЯ, использованных в работе; В. В. Яковлеву и И. А. Барсукову (АО «Российские космические системы») за предоставление технической информации по прибору МТВЗА-ГЯ; В. Б. Хайкину (Специальная астрофизическая обсерватория РАН) за полезные обсуждения; И. Ю. Лапшову (ИКИ РАН) за помощь в расчётах координат Солнца и Н. Ю. Комаровой (ИКИ РАН) за помощь в оформлении материалов.

Литература

1. Барсуков И. А., Митник Л. М., Болдырев В. В. и др. Метеорологический спутник «Метеор-М» № 2-3: предварительные результаты микроволнового зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 1. С. 315–326. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-315-326.
2. Ермаков Д. М., Кузьмин А. В., Мазуров А. А. и др. Концепция потоковой обработки данных российских спутниковых СВЧ-радиометров серии МТВЗА на базе ЦКП «ИКИ-Мониторинг» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 298–303. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-298-303.
3. Заболотских Е. В., Балашова Е. А., Азаров С. М. Восстановление сплочённости морского льда по данным измерений МТВЗА-ГЯ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 27–38. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-27-38.
4. Пашинов Е. В. Восстановление интегрального паросодержания атмосферы по данным прибора МТВЗА-ГЯ («Метеор-М» № 2) над поверхностью океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 225–235. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-225-235.
5. Садовский И. Н., Сазонов Д. С. Географическая привязка данных дистанционных радиометрических измерений МТВЗА-ГЯ // Исслед. Земли из космоса. 2022. Т. 202. № 6. С. 101–112. DOI: 10.31857/S0205961422060100.
6. Садовский И. Н., Сазонов Д. С. Корректировка географической привязки данных МТВЗА-ГЯ // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 6. С. 73–85. DOI: 10.31857/S0205961423060076.
7. Сазонов Д. С. Исследование возможности восстановления интенсивности осадков по измерениям МТВЗА-ГЯ // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 5. С. 23–35. DOI: 10.31857/S020596142305007X.

8. *Топчило Н. А.* Обработка солнечных наблюдений на радиотелескопе РАТАН-600. I. Стандартные методики: учеб. пособие. СПб., 2021. 71 с.
9. *Филей А. А., Андреев А. И., Успенский А. Б.* Использование искусственных нейронных сетей для восстановления температурно-влажностного состояния атмосферы по данным спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ КА Метеор-М № 2-2 // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 6. С. 83–95. DOI: 10.31857/S0205961421060087.
10. *Xiao H., Han W., Han Y. et al.* First trial for the assimilation of radiance data from MTVZA-GY on board the new Russian satellite Meteor-M N2-2 in the CMA-GFS 4D-VAR system// Quarterly J. Royal Meteorological Soc. 2024. V. 150. Iss. 765. P. 5000–5019. DOI: 10.1002/qj.4853.

Determination of antenna system parameters of MTVZA-GYa scanner/sounder operating on board Meteor-M No. 2-4 spacecraft

I. N. Sadovsky, D. S. Sazonov

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: Ilya_Nik_Sad@mail.ru*

The paper presents the results of determining actual characteristics of antenna system of the Russian scanner/sounder named MTVZA-GYa (Microwave Atmospheric Temperature and Humidity Sounding Module, GYa — in memory of G. Ya. Gus'kov (1918–2002)), currently operating on board Meteor-M No. 2-4 spacecraft. The research is based on measurements of the intensity of radiothermal radiation of the solar disk and its surroundings, carried out by this instrument on May 22 and 28, 2024. On the dates, the spacecraft performed a roll maneuver to the right (relative to the flight direction), which opened the possibility to observe open space in part of the instrument's working scanning sector. For the descending half-turns, the condition of proximity of the MTVZA-GYa instantaneous observation vectors and the Sun-position vector (both calculated in the inertial coordinate system) was fulfilled. During the processing of the available data, for each measurement the Sun-position vector was transferred to a coordinate system formed by an instantaneous triple of vectors that determine the spatial and polarization orientation of the antenna. Next, the obtained coordinates were converted into the space of angles, defined by the instrument's scanning geometry and as close as possible to the concept of 3D antenna radiation pattern. The final operation of normalizing the obtained radiothermal images made it possible to identify the direction of maximum radiation and the isolines of the half-power level. The main task was to determine the mutual orientation of the optical beams of sight of individual frequency channels of the scanner/sounder, related to different feeds of the antenna system. Relative to the calculated position of the Sun's disk center, they were: for the 6.9–23.8 GHz channel group — (–0.85°; 0.52°); for the 31.5–48.0 GHz channel group — (–1.65°; 0.33°); for the 52.0–91.65 GHz channel group — (–1.13°; –0.47°), and for the 165–183 GHz channels — (0.1°; 0.0°). The obtained forms of antenna patterns, practically for all frequencies of MTVZA-GYa, have the shape of an ellipse, with different degree of compression and orientation of the main axis. Estimates of their width (especially in the *H*-plane) exceed the values obtained by equipment developers based on electrodynamic modeling. The results of model estimates of the expected MTVZA-GYa signals during scanning of the Sun, performed by the authors, confirm correctness of the data presented in the article.

Keywords: MTVZA-GYa, Meteor-M No. 2-4, 3D antenna radiation pattern, orientation of optical sighting beams, observation of the Sun disk

Accepted: 19.09.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-6-100-114

References

1. Barsukov I. A., Mitnik L. M., Boldyrev V. V. et al., Meteorological satellite Meteor-M No. 2-3: Preliminary results of microwave sensing of the Earth, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 1, pp. 315–326 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-315-326.
2. Ermakov D. M., Kuzmin A. V., Mazurov A. A. et al., The concept of streaming data processing of Russian satellite microwave radiometers of the MTVZA series based on IKI-Monitoring Center for Collective Use, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 4, pp. 298–303 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-298-303.
3. Zabolotskikh E. V., Balashova E. A., Azarov S. M., Sea ice concentration retrieval from MTVZA-GYa measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 1, pp. 27–38 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-27-38.
4. Pashinov E. V., Retrieval of integrated water vapor content of the atmosphere over the ocean using MTVZA-GY (Meteor-M No. 2) data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 4, pp. 225–235 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-4-225-235.
5. Sadovsky I. N., Sazonov D. S., Geographical reference of MTVZA-GYa's radiometric remote sensing data, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 202, No. 6, pp. 101–112 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961422060100.
6. Sadovsky I. N., Sazonov D. S., Correction procedure for MTVZA-GYa georeference, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2023, No. 6, pp. 73–85 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961423060076.
7. Sazonov D. S., Study the possibility of precipitation intensity recovery from MTVZA-GYa measurements, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2023, No. 5, pp. 23–35 (in Russian), DOI: 10.31857/S020596142305007X.
8. Topchilo N. A., *Obrabotka solnechnykh nablyudenii na radioteleskope RATAN-600. I. Standartnye metodiki: Uchebnoe posobie* (Processing of solar observations on the RATAN-600 radio telescope. I. Standard methods: Tutorial), Saint Petersburg, 2021, 71 p. (in Russian).
9. Filei A. A., Andreev A. I., Uspensky A. B., Using of a neural network algorithm for retrieval temperature and humidity sounding of the atmosphere from satellite-based microwave radiometer MTVZA-GY measurements on-board Meteor-M No. 2-2, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2021, No. 6, pp. 83–95 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961421060087.
10. Xiao H., Han W., Han Y. et al., First trial for the assimilation of radiance data from MTVZA-GY on board the new Russian satellite Meteor-M N2-2 in the CMA-GFS 4D-VAR system, *Quarterly J. Royal Meteorological Soc.*, 2024, V. 150, Iss. 765, pp. 5000–5019, DOI: 10.1002/qj.4853.