

Новый подход к реализации процедуры географической привязки измерений МТВЗА-ГЯ

И. Н. Садовский¹, Д. С. Сазонов¹, А. В. Клитная²

¹ *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: Ilya_Nik_Sad@mail.ru*

² *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова
Москва, 119991, Россия*

Представлено описание нового подхода к реализации процедуры географической привязки измерений российского сканера/зондировщика МТВЗА-ГЯ (Модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы, ГЯ — в память о Геннадии Яковлевиче Гуськове (1918–2002)). В рамках исследования проведён анализ особенностей функционирования существующего алгоритма геопривязки приборов данной серии. Показано, что часть из базовых приближений, лежащих в основе данной операции, требует пересмотра, поскольку они могут стать источником дополнительных ошибок при интерпретации данных дистанционного зондирования. В обновлённом алгоритме географической привязки предложено опираться на уже неоднократно подтверждённый факт, что на разных частотах направления визирования прибора не совпадают. Таким образом, вместо одного мгновенного вектора наблюдений требуется генерация группы векторов, каждый из которых относится к фиксированной группе частотных каналов МТВЗА-ГЯ. Соответствующие изменения внесены в программную реализацию процедуры географической привязки. На примере реальных измерений прибора, функционирующего на борту космического аппарата «Метеор-М» № 2-4, показана возможность обеспечения высокого качества географической привязки за счёт введения корректирующих добавок к углу раскрыва конуса сканирования и азимутального смещения по его поверхности. Выполнены предварительные оценки этих углов для указанной версии прибора. Проведено сравнение полученного межканального углового смещения осей визирования МТВЗА-ГЯ с результатами наблюдений солнечного диска, выполненных авторами ранее.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, СВЧ-радиометрия, микроволновый сканер/зондировщик МТВЗА-ГЯ, космический аппарат «Метеор-М» № 2-4, ориентация оптических лучей визирования, географическая привязка данных ДЗЗ

Одобрена к печати: 14.08.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-87-95

Введение

Антенные системы приборов серии МТВЗА-ГЯ (Модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы, ГЯ — в память о Геннадии Яковлевиче Гуськове (1918–2002)) реализуются в виде однозеркальных параболических антенн с боковым облучением рефлектора (см., например, (Барсуков и др., 2025)). Широкий диапазон частот принимаемого излучения требует применения нескольких физически разделённых облучателей, каждый из которых оптимизирован в своей полосе. Подобный подход неизбежно приводит к ситуации, когда максимумы излучения (лучи визирования) отдельно взятых групп частотных каналов ориентированы по-разному.

В идеальном случае, когда соблюдены все требования как в части сборки оптической схемы антенны, так и амплитудного и фазового распределения в её апертуре, подобная реализация должна характеризоваться одинаковым углом раскрыва конуса сканирования, с угловым смещением лишь в азимутальной плоскости, обусловленным разнесением облучателей. Для устранения последнего разработчиками МТВЗА-ГЯ предусмотрена операция аппаратного смещения лучей визирования, основанная на введении временных задержек (с учётом скорости вращения антенного блока), различных для каждой группы частотных каналов.

В реальных условиях обеспечить сонаправленность лучей визирования многочастотных сканеров/зондировщиков не удаётся никогда. Сказанное относится как непосредственно к российскому инструменту МТВЗА-ГЯ, так и к его зарубежным аналогам, таким как ATMS (*англ.* Advanced Technology Microwave Sounder), SSMIS (*англ.* Special Sensor Microwave Imager/Sounder) и AMSR (*англ.* Advanced Microwave Scanning Radiometer). Проблема получения квазисинхронных данных об интенсивности уходящего излучения одного и того же участка поверхности на разных частотах решается при этом за счёт введения в процедуру географической привязки корректирующих углов крена, тангажа и рыскания прибора/носителя.

Применительно к приборам серии МТВЗА-ГЯ авторами настоящей публикации были предложены независимая схема реализации географической привязки измерений (Садовский, Сазонов, 2022), алгоритм поиска корректирующих углов для разных групп частотных каналов (Садовский, Сазонов, 2023; Сазонов, Садовский, 2024), а также наборы этих углов для приборов как закончивших, так и продолжающих функционировать на космических аппаратах (КА) «Метеор-М» с номерами 2-2, 2-3 и 2-4. Проведённые оценки показали, что при этом удаётся обеспечить среднюю точность географической привязки на уровне 5 км, что более чем вдвое меньше заявленного элемента разрешения системы.

Несмотря на это, детальный анализ получаемых при этом радиометрических портретов и их особенностей, прямое общение с разработчиками в совокупности с более глубоким пониманием специфики работы МТВЗА-ГЯ выявили ряд замечаний к существующему алгоритму реализации операции географической привязки данного инструмента. Их обсуждению, а также поиску альтернативного подхода геопривязки измерений российских сканеров/зондировщиков данной серии посвящена содержательная часть настоящей публикации.

Особенности работы существующего алгоритма геопривязки

Реализуемый в настоящее время алгоритм географической привязки измерений МТВЗА-ГЯ строится на двух (помимо прочих) базовых утверждениях: лучи визирования всех частотных каналов образуют с осью вращения прибора угол $53,3^\circ$; физическое расхождение лучей по поверхности конуса сканирования компенсируется в рамках процедуры их аппаратного сведения.

В данной постановке единственным свободным параметром, который может быть использован для корректировки процедуры геопривязки измерений, представляется ориентация оси вращения антенного блока $\mathbf{O}_{rot}$, определяемая через отклонение приборной системы координат (ПСК) в системе координат космического аппарата (СККА). Данное преобразование реализуется в ходе последовательного поворота оси вращения $\mathbf{O}_{rot}$ вокруг соответствующих осей СККА на углы крена, тангажа и рыскания прибора (α_K , α_T и α_P).

При этом, однако, возникает ряд вопросов, требующих обсуждения.

Первый вопрос касается источника возникающего статичного наклона оси вращения прибора. Разработчики аппаратуры утверждают, что строительные оси КА совпадают с соответствующими осями МТВЗА-ГЯ. Если смещения нет, то с точки зрения геометрии решаемой задачи аналогичный эффект может давать статичная ошибка ориентации КА на орбите. Однако анализ информации, поступающей со звёздных датчиков, говорит о том, что максимально наблюдаемые угловые отклонения КА не превышают $0,05\text{--}0,1^\circ$, т.е. спутник-носитель сохраняет стабильную ориентацию на орбите. Таким образом, наклон оси вращения прибора объективно необходим для повышения точности геопривязки, но объяснить причину его возникновения с точки зрения конструкции прибора и геометрии его сканирования — невозможно.

Предыдущие работы авторов настоящей публикации в области географической привязки измерений МТВЗА-ГЯ позволили определить наборы корректирующих углов крена, тангажа и рыскания для всех приборов данной серии. Их анализ показал, что для всех версий прибора характерна ситуация, когда оптимальные корректирующие углы, найденные для отдельно взятой группы частотных каналов, не могут быть распространены на остальные. Таким обра-

зом, качественная геопривязка всех измерений МТВЗА-ГЯ возможна в том случае, если ось вращения антенной системы для каждой группы частот имеет свою (!) ориентацию в пространстве, что физически невозможно. Это является вторым вопросом к существующему алгоритму географической привязки.

Помимо этого, следует иметь в виду следующие особенности проводимых измерений.

Во-первых, это вариации углов встречи с Землёй. В настоящий момент эта величина (65°) является фиксированной и приведена во всех технических описаниях приборов серии МТВЗА-ГЯ. При этом расчёт реальных значений данного параметра показывает (рис. 1, слева), что даже в случае штатной ориентации прибора на орбите наблюдается его пространственная изменчивость, вызванная естественной кривизной и несферичностью нашей планеты. При наклоне оси вращения прибора картина распределения углов встречи с Землёй существенно усложняется (см. рис. 1, справа). Становится заметной не только широтная зависимость этого параметра, но и неравномерность в пределах одного оборота антенного блока (скана). Следует отметить, что этот эффект имеет разные проявления для каждой группы частотных каналов ввиду отличного наклона их осей вращения.

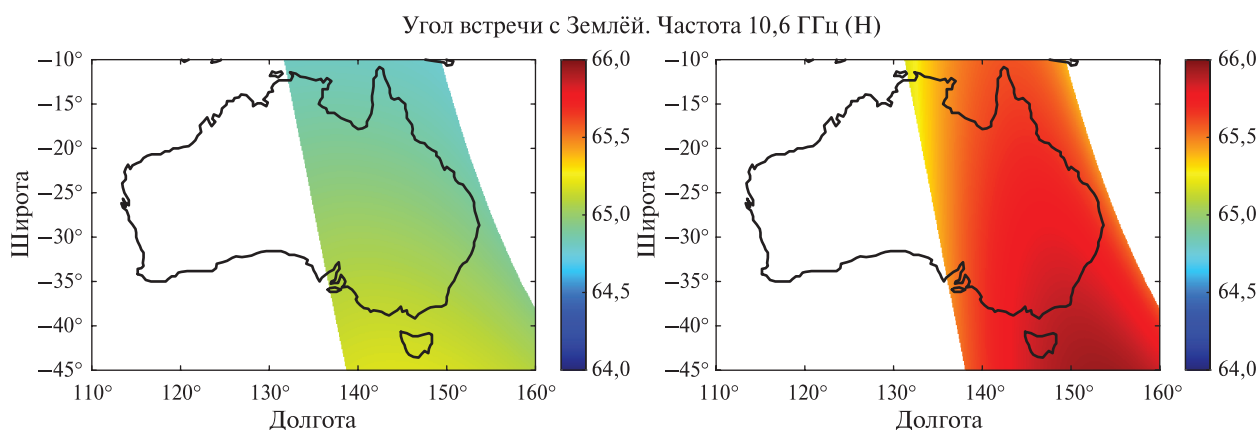


Рис. 1. Расчётные значения углов встречи с Землёй. Случай штатной ориентации МТВЗА-ГЯ (слева), изменение ориентации прибора в соответствии с корректирующими углами (КА «Метеор-М» № 2-4) (справа). Восходящие полувитки

Изменение геометрии сканирования МТВЗА-ГЯ, вызванное необходимостью введения корректирующих геопривязку углов, также приводит к появлению угла отклонения плоскости поляризации принимаемого излучения от плоскости падения. В настоящий момент оценка данного параметра не проводится, а соответствующий угол α^{pol} считается равным нулю. На рис. 2 (см. с. 90) приведены результаты оценок α^{pol} для группы частотных каналов 52,0–91,65 ГГц (КА «Метеор-М» № 2-4). В левой части рисунка видна однородная картина околонулевых значений, получаемая в строгом соответствии с закладываемой разработчиками идеологией сканирования прибора. Введение корректирующих углов α_K , α_T и α_P , обеспечивающих качественную географическую привязку, приводит к существенным вариациям α^{pol} (см. рис. 2, справа). Как и в случае с углами встречи с Землёй, данный эффект имеет разный характер для отдельных групп частотных каналов.

Оба описанных параметра являются входными данными для моделей переноса излучения, привлекаемых для решения обратных задач пассивной радиополяриметрии. Соответственно, их оценка и последующий учёт — обязательная процедура обработки измерений. Данный факт приобретает особое значение в свете планируемых запусков следующих приборов данной серии — МТВЗА-МП, где измерения будут проводиться в полном поляризационном базисе. В работе (Садовский, Сазонов, 2020) на примере экспериментальных данных было показано, что при определённых условиях приращение ошибки измерения третьего параметра Стокса может составлять порядка 1 К на каждые $0,1^\circ$ поворота поляризации.

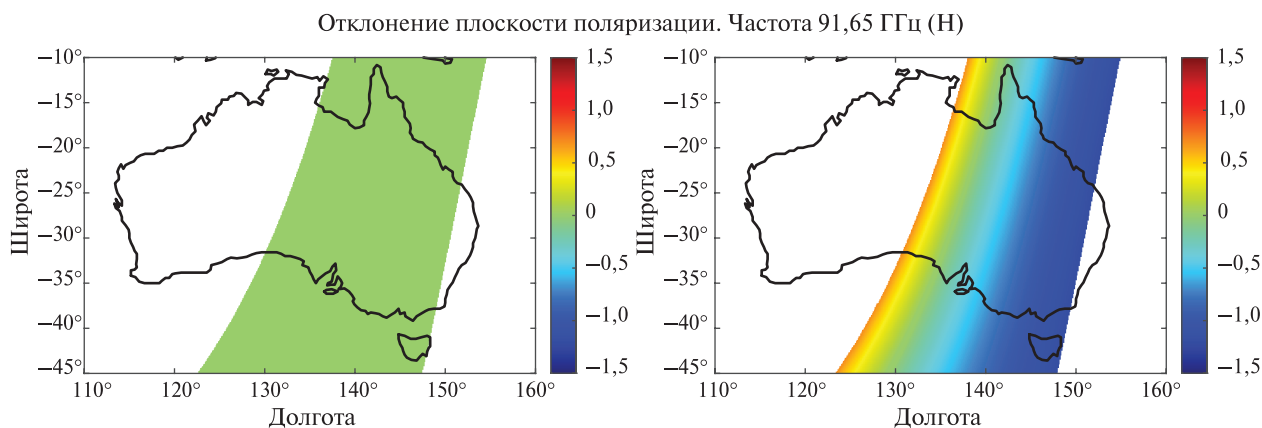


Рис. 2. Расчётные значения отклонения плоскости падения от плоскости поляризации. Случай штатной ориентации МТВЗА-ГЯ (слева), изменение ориентации прибора в соответствии с корректирующими углами (КА «Метеор-М» № 2-4) (справа). Нисходящие полулитки

Приведённые несоответствия существующего алгоритма географической привязки измерений МТВЗА-ГЯ, а также сложность и неочевидность последующего учёта особенностей, возникающих при его использовании, свидетельствуют о необходимости поиска альтернативных подходов в реализации данной процедуры.

Предложения по модификации существующего алгоритма географической привязки

По мнению авторов настоящей публикации, лежащие в основе нового алгоритма географической привязки измерений МТВЗА-ГЯ базовые утверждения о принципе его функционирования должны быть пересмотрены. В частности, нужно принять тот факт, что в силу объективных причин создание многочастотной антенной системы с разнесёнными облучателями, обеспечивающей одинаковый угол раскрыва конуса сканирования для всех частотных каналов, — невозможно. Второе — реализуемая в настоящее время процедура аппаратного сведения лучей визирования требует корректировки (либо полного отказа от неё в пользу наземного программного сведения, по примеру зарубежных аналогов). Очевидно, что настройка параметров данной операции в ходе наземных испытаний не позволяет достичь требуемого уровня точности и должна корректироваться на основе лётных испытаний.

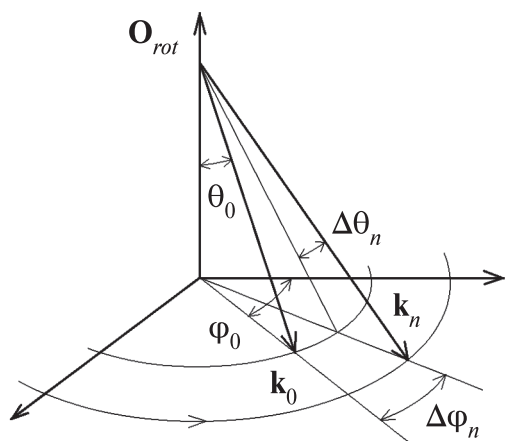


Рис. 3. Соотношение мгновенных векторов наблюдения в ПСК

В новом варианте географической привязки измерений МТВЗА-ГЯ предлагается для каждого момента времени/измерения выполнять генерацию нескольких векторов наблюдения $\mathbf{k}_n$ (где индекс n соответствует номеру группы частотных каналов, объединённых одним облучателем). При этом общая геометрия сканирования, как и прежде, в ПСК задаётся некоторым опорным вектором наблюдения $\mathbf{k}_0$ через пару углов φ_0 и θ_0 (для определённости, соответствующим значениям, приведённым в технической документации: $\theta_0 = 53,3^\circ$, $\varphi_0 = 0^\circ$). Отклонение вектора визирования каждой отдельно взятой группы частотных каналов определяется парой корректировочных углов $\Delta\theta_n$ и $\Delta\varphi_n$, отвечающих за изменение угла раскрыва конуса сканирования (вертикальный угол) и смещение луча по его поверхности (азимут) (рис. 3).

Используемые ранее для изменения ориентации оси вращения антенного блока $\mathbf{O}_{rot}$ углы крена, тангажа и рыскания (α_K , α_T и α_P) сохраняются (как и соотношения для расчёта матрицы перехода $\mathbf{M}^{СККА \leftarrow ПСК}$, приведённые в работе (Садовский, Сазонов, 2022)). При этом накладывается ограничение — в силу того, что $\mathbf{O}_{rot}$ является общей для всех групп частотных каналов, элементы $\mathbf{M}^{СККА \leftarrow ПСК}$ имеют одинаковые значения для всех частот.

Также требует корректировки используемое ранее положение о совпадении орбитальной системы координат (ОСК) и СККА, превращающее соответствующую матрицу $\mathbf{M}^{ОСК \leftarrow СККА}$ в единичную. Космический аппарат «Метеор-М» № 2-4, несущий на борту последнюю версию МТВЗА-ГЯ, периодически выполняет плановые манёвры. Ранее, ввиду редкости данного события, поступающие в эти периоды данные измерений сканера/зондировщика исключались из обработки. К настоящему моменту стало очевидно, что эта информация может быть не просто полезной, но и необходимой (Садовский, Сазонов, 2024). Для корректной оценки направления визирования системы на период выполнения манёвра (с параметрами β_K , β_T и β_P (суть — углы крена, тангажа и рыскания КА), которые определяются системой звёздных датчиков, установленных на спутнике-носителе) необходим расчёт действующих значений матрицы $\mathbf{M}^{ОСК \leftarrow СККА}$.

Все указанные изменения были интегрированы в программный комплекс, реализующий операцию географической привязки измерений МТВЗА-ГЯ, для проверки общей корректности предложенного подхода и оценки характера влияния углов $\Delta\theta_n$ и $\Delta\varphi_n$ на формируемые радиотепловые портреты. Её результаты показали, что использование модифицированного алгоритма позволяет выполнить первичную привязку результатов измерений без каких-либо критических сбоев, а в силу идентичности итоговых значений матриц перехода и, соответственно, векторных преобразований получаемые картины полностью повторяют результаты алгоритма прошлой версии (для случая, когда в обеих версиях не используются корректирующие углы).

При этом введение в расчёт углов $\Delta\theta_n$ и $\Delta\varphi_n$ имеет более предсказуемый эффект по сравнению с тройкой α_K , α_T и α_P из прошлой версии. Так, увеличение значения $\Delta\theta_n$ приводит к равномерному расширению радиометрического изображения и его смещению в сторону, противоположную направлению полёта. Положительные значения $\Delta\varphi_n$ смещают распределение яркости в сторону вращения антенного блока прибора.

Одной из наиболее важных особенностей модифицированного алгоритма геопривязки измерений МТВЗА-ГЯ следует считать постоянство расчётных значений угла встречи с Землёй и отсутствие отклонений поляризации регистрируемого излучения, как и задумывалось авторами. Для сокращения объёма статьи конкретные изображения опущены, однако они имеют характер, аналогичный левым изображениям *рис. 1* и *2*.

Оценка возможности поиска оптимальных корректирующих углов

Одним из этапов разработки нового алгоритма географической привязки измерений МТВЗА-ГЯ была оценка потенциальной возможности повышения её точности за счёт предлагаемых углов $\Delta\theta_n$ и $\Delta\varphi_n$.

Описанный в работе (Садовский, Сазонов, 2023) для существующего алгоритма геопривязки метод поиска оптимальных углов крена, тангажа и рыскания использует в качестве минимизирующей функции число элементов поверхности, в которых разница радиотеплового излучения, измеренного на восходящих и нисходящих полувитках, превышает уровень в 20 К. То есть идеологически данная технология не зависит от программы сканирования, метода определения ориентации прибора, технологии сведения лучей на разных частотах и т. п. Для её реализации нужно знать координаты точки наблюдения и интенсивность излучения наблюдаемого участка поверхности. Таким образом, она может быть использована и в новой версии алгоритма для нахождения корректирующих пар углов $\Delta\theta_n$ и $\Delta\varphi_n$, повышающих точность геопривязки каждой группы частотных каналов прибора.

Поскольку основная цель настоящей публикации — описание модифицированного алгоритма географической привязки, а не точной его настройки, ниже приведены результаты первичной корректировки, основанные на анализе одного дня измерений МТВЗА-ГЯ (5 апреля 2024 г.) и только для одного из шести тестовых полигонов («Австралия»), используемых в работе (Садовский, Сазонов, 2023).

В качестве первого приближения применялся последовательный перебор сочетаний $\Delta\theta_n$ и $\Delta\varphi_n$. Шаг квантования равен $0,1^\circ$ для обоих углов. Диапазон поиска составил $\pm 0,5^\circ$ относительно найденных предварительно, в ручном режиме, предполагаемых оптимальных значений. Пример распределения функции ошибки, рассчитанной для частотного канала 10,6 ГГц (горизонтальная поляризация), приведён на рис. 4. Видно, что двумерная зависимость имеет хорошо выраженный минимум, соответствующий $\Delta\theta_n = 0,3^\circ$ и $\Delta\varphi_n = -3,3^\circ$. При этом ошибка геопривязки более чувствительна к вариациям угла $\Delta\theta_n$, чем к $\Delta\varphi_n$.

В свою очередь, использование найденных корректирующих углов в модифицированной процедуре географической привязки обеспечивает высокую точность совпадения радиометрического портрета с географическими объектами (рис. 5). К настоящему моменту времени авторы не располагают численными оценками качества геопривязки (для их выполнения требуется анализ большого объёма геопривязанных измерений, которые должны быть получены на основе усовершенствованного алгоритма), однако визуальное сравнение с результатами, представленными, например, в работе (Садовский, Сазонов, 2023), свидетельствует об их одинаковом уровне.

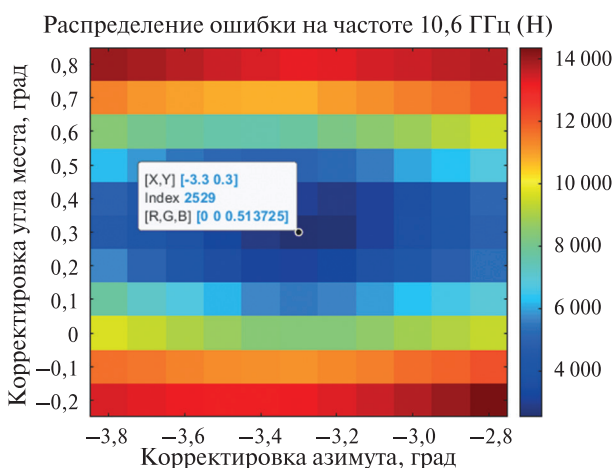


Рис. 4. Минимизируемая функция процедуры поиска оптимальных корректирующих геопривязку углов

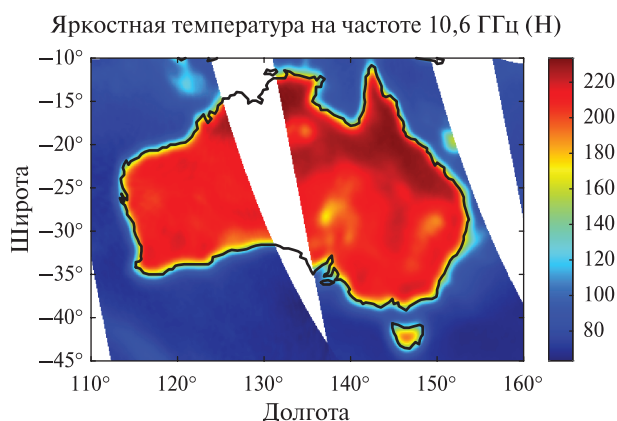


Рис. 5. Результат географической привязки измерений МТВЗА-ГЯ с корректирующими углами из рис. 4

В соответствии с идеологией нового варианта географической привязки, частотные каналы, объединённые одним облучателем (с номером n), имеют общее направление визирования, а корректировка их совместной ориентации выполняется едиными значениями $\Delta\theta_n$ и $\Delta\varphi_n$. Соответственно, авторами настоящей работы был выполнен поиск корректирующих углов $\Delta\theta_n$ и $\Delta\varphi_n$ для большинства частотных каналов МТВЗА-ГЯ с последующим усреднением результатов, относящихся к одному облучателю. Полученные значения средних величин $\Delta\theta_n$ и $\Delta\varphi_n$, с отображением их разброса приведены на рис. 6 (слева) (см. с. 93).

Следует отметить следующую интересную особенность полученного результата. Найденные пары корректирующих углов как по их взаимному расположению, так и по порядку величины их смещения друг относительно друга совпадают с результатами (рис. 7, см. с. 93) определения направлений максимумов диаграммы направленности МТВЗА-ГЯ (как многолучевой системы), выполненными авторами для случаев наблюдения Солнца (см. работы (Садовский, Сазонов, 2024) или (Садовский, Сазонов, 2025)). Зеркальное отображение по азимуту объясняется различием в выборе его положительного приращения, а разница

в смещении всей картины целиком — неопределённостью в ориентации спутника на момент сканирования околосолнечного пространства. Конечно, оба результата будут уточняться в будущем за счёт увеличения объёма анализируемых данных, однако уже наблюдаемое сходство является как косвенным подтверждением их обоих, так и свидетельством в пользу перехода на новый модифицированный алгоритм географической привязки измерений приборов серии МТВЗА-ГЯ (с использованием именно наборов $\Delta\theta_n$ и $\Delta\varphi_n$).

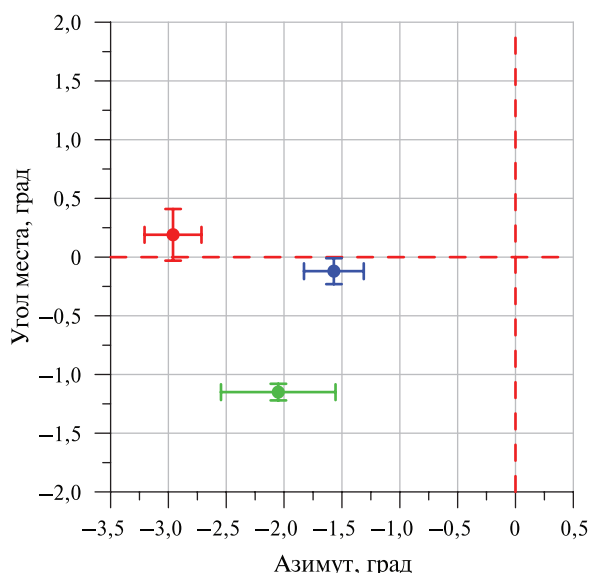


Рис. 6. Результаты предварительных оценок углов для корректировки географической привязки измерений МТВЗА-ГЯ (КА «Метеор-М» № 2-4)

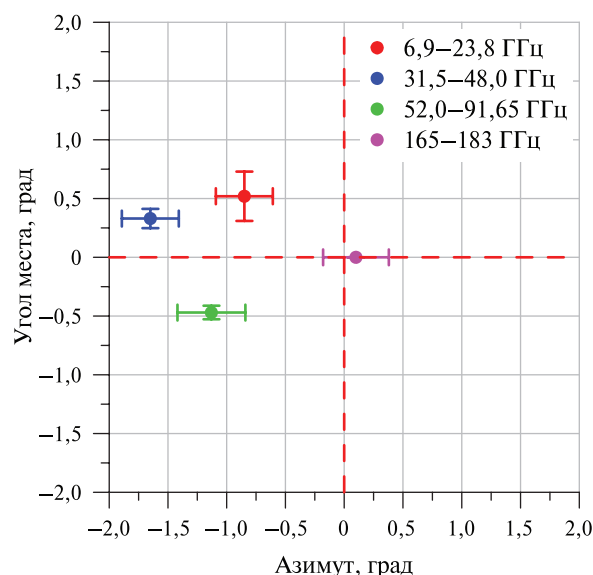


Рис. 7. Результат определения ориентации лучей визирования МТВЗА-ГЯ (КА «Метеор-М» № 2-4) по наблюдениям солнечного диска

Заключение

К основным результатам проведённых исследований следует отнести следующие:

Во-первых, продемонстрирован ряд особенностей реализации существующего алгоритма географической привязки измерений приборов серии МТВЗА-ГЯ. Несмотря на высокое качество получаемых композитных изображений, их корректное использование в моделях переноса излучения является затруднительным ввиду наличия искусственно создаваемых ошибок в расчётах вспомогательных параметров, которые могут приводить к неверной трактовке результатов измерений.

Во-вторых, на основе анализа принципов технической реализации приборов МТВЗА-ГЯ, а также опыта по обработке измерений трёх инструментов данной серии предложен альтернативный метод географической привязки. Его основой стало положение о разной ориентации лучей визирования отдельных частотных каналов МТВЗА-ГЯ. При этом угловые расхождения между лучами постоянны и являются индивидуальной характеристикой данной конкретной версии прибора.

В-третьих, на примере обработки географической привязки измерений версии МТВЗА-ГЯ, функционирующего на борту КА «Метеор-М» № 2-4, продемонстрирована работоспособность предложенного подхода, а также возможность повышения качества геопривязки для всех групп частотных каналов путём подбора параметров $\Delta\theta_n$ и $\Delta\varphi_n$.

В заключении, показано совпадение величин угловых смещений между ориентациями лучей визирования отдельных групп частотных каналов, полученное в рамках двух независимых подходов: на основе совмещения географических береговых линий с радиометрическими изображениями и по результатам сканирования солнечного диска.

Последний факт будет дополнительно проверяться в будущих исследованиях авторов. С этой целью планируется обработка дополнительных эпизодов наблюдения Солнца, а также

автоматизация алгоритма нахождения оптимальных значений $\Delta\theta_n$ и $\Delta\varphi_n$ с последующим анализом всех доступных измерений МТВЗА-ГЯ (КА «Метеор-М» № 2-4).

Особо следует отметить, что новый подход в реализации географической привязки измерений МТВЗА-ГЯ, в совокупности с включением наблюдений солнечного диска в программу лётных испытаний будущих приборов этой серии, даст уникальную возможность реальной географической привязки чисто «атмосферных» каналов прибора, в настоящее время, по сути, не выполняемой.

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, 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. Садовский И. Н., Сазонов Д. С. Третий параметр Стокса собственного излучения взволнованной морской поверхности. Результаты натурных измерений // Материалы 18-й Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2020. С. 244. DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
3. 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.
4. 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.
5. Садовский И. Н., Сазонов Д. С. Первые оценки разрешающей способности МТВЗА-ГЯ на основе наблюдений солнечного диска // Материалы 22-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2024. С. 65. DOI: 10.21046/22DZZconf-2024a.
6. Садовский И. Н., Сазонов Д. С. Оценка характеристик антенной системы МТВЗА-ГЯ, функционирующего на борту КА «Метеор-М» № 2-4 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. № 6 (в печати).
7. Сазонов Д. С., Садовский И. Н. Корректировка географической привязки частотных каналов 52–91 ГГц спутникового микроволнового радиометра МТВЗА-ГЯ // Исслед. Земли из космоса. 2024. № 2. С. 88–100. DOI: 10.31857/S0205961424020082.

New approach to implementation of georeferencing procedure for MTVZA-GYa measurements

I. N. Sadovsky¹, D. S. Sazonov¹, A. V. Klitnaya²

¹ Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: Ilya_Nik_Sad@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

The paper presents a description of a new approach to implementation of the georeferencing procedure for data of the Russian scanner/sounder MTVZA-GYa (Microwave Atmospheric Temperature and Humidity Sounding Module, GYa — in memory of G. Ya. Gus'kov (1918–2002)). As part of the study,

an analysis was made of the operating features of the existing georeferencing algorithm for instruments of this series. It is shown that some of the basic underlying approximations require revision, since they can be a source of additional errors in the interpretation of remote sensing data. The updated georeferencing algorithm proposes to rely on the repeatedly confirmed fact that the directions of sight of this instrument at different frequencies do not match. Thus, instead of one instantaneous observation vector, it is necessary to generate a group of vectors, each of which belongs to a fixed group of MTVZA-GYa frequency channels. The corresponding changes have been made to the georeferencing software. On the basis of real measurements of the instrument operating on board the Meteor-M No. 2-4 spacecraft, the possibility of ensuring high-quality georeferencing by introducing corrective additives to the scanning cone aperture angle and azimuthal shift along its surface was demonstrated. Preliminary estimates of these angles were made for the specified version of the instrument. A comparison was made of the obtained interchannel angular displacement of MTVZA-GYa sight directions with the results of observations of the solar disk carried out by the authors earlier.

Keywords: remote sensing, microwave radiometry, microwave scanner/sounder MTVZA-GYa, spacecraft Meteor-M No. 2-4, orientation of optical sighting directions, georeferencing of remote sensing data

Accepted: 14.08.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-5-87-95

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. 25, No. 1, pp. 315–326 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-315-326.
2. Sadovsky I. N., Sazonov D. S., The third Stokes parameter of the radiothermal radiation of a rough sea surface. Results of in-situ measurements, *Materialy 18-i Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. of the 18th All-Russia Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow: IKI RAS, 2020, p. 244 (in Russian), DOI: 10.21046/18DZZconf-2020a.
3. Sadovsky I. N., Sazonov D. S., Geographical reference of MTVZA-GYa radiometric remote sensing data, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 202, No. 6, pp. 101–112 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961422060100.
4. 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.
5. Sadovsky I. N., Sazonov D. S., First estimates of the resolution of MTVZA-GYa based on observations of the solar disk, *Materialy 22-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (Proc. 22nd Intern. Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow: IKI RAS, 2024, p. 65 (in Russian), DOI: 10.21046/22DZZconf-2024a.
6. Sadovsky I. N., Sazonov D. S., Determination of the MTVZA-GYa antenna system parameters, operating on board METEOR-M No. 2-4, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, No. 6 (in Russian) (in print).
7. Sazonov D. S., Sadovsky I. N., Geographical reference adjustment of MTVZA-GYa satellite microwave radiometer frequency channels 52–91 GHz, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2024, No. 2, pp. 88–100 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961424020082.