

Метод наклонной калибровки радиометрического приёмника в натуральных условиях

Д. С. Сазонов, И. Н. Садовский, Е. В. Пашинов, А. В. Кузьмин

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: sazonov_33m7@mail.ru

Работа посвящена описанию и сравнению двух вариантов реализации метода наклонной калибровки, проводимой на основе анализа угловой зависимости нисходящего излучения атмосферы. Калибровка применяется для установления взаимно-однозначного соответствия между сигналом на выходе радиометра и интенсивностью излучения среды. Оба представленных метода («итерационный» и вариант поиска опорного «холодного» источника радиоизлучения) позволяют выполнять указанную операцию при проведении натуральных экспериментальных исследований. Рассматриваемые варианты калибровки возможно использовать только в приближении плоской однослойной атмосферы, что, естественно, накладывает ограничение на возможные метеорологические условия в точке реализации эксперимента, а также на диапазон зенитных углов измерений, привлекаемых в данной операции. Основой итерационного алгоритма, применяемого традиционным коллективом авторов при обработке натуральных данных, является псевдослучайная генерация как набора метеопараметров, входящих в модель излучения атмосферы, так и непосредственно калибровочных коэффициентов радиометрического приёмника, обеспечивающих минимизацию функции невязки расчётных значений яркости небосвода и экспериментально измеренных. Вариант поиска опорного холодного источника радиоизлучения базируется на линейности зависимости излучения атмосферы от её коэффициента оптической толщины в паре с линейностью передаточной функции радиометра. Это позволяет на основе угловой зависимости яркости атмосферы выполнять поиск (в рамках используемых приближений) точки калибровочной прямой, которая бы соответствовала измерениям излучения холодного космоса (отсюда и условное названия метода), принципиально недостижимое в наземных условиях. Детально описанию обоих вариантов, используемых в них приближений и допущений, а также рассмотрению преимуществ и недостатков каждого и посвящена содержательная часть работы. Показано, что метод калибровки по холодному источнику излучения является предпочтительным в силу инвариантности к физической температуре атмосферы и возможности онлайн-оценки калибровочных коэффициентов при полном совпадении с результатами итерационного подхода.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, внешняя калибровка, радиометр, натуральный эксперимент, модель атмосферы

Одобрена к печати: 29.05.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-40-50

Введение

Одним из направлений работы сотрудников отдела Исследований Земли из космоса Института космических исследований (ИКИ РАН) является постановка натуральных экспериментов по исследованию взаимодействия морской поверхности и атмосферы посредством регистрации собственного микроволнового излучения, образуемого в этой системе. Проводимые измерения позволяют изучать спектр морского волнения и закономерности его формирования под действием ветрового потока (Садовский и др., 2016), уточнять существующие модели переноса излучения за счёт получения новых сведений о соответствии ветро-волновой обстановки регистрируемым радиотепловым портретам (Садовский, Сазонов, 2024; Сазонов и др., 2024) и т. п. Начиная с 2005 г. эти эксперименты проводятся на регулярной основе на океанографической платформе Черноморского гидрофизического полигона (ЧГП РАН), и, помимо микроволновых измерений, проводятся независимые измерения широкого спектра метеорологических параметров (скорость и направление ветра, температура атмосферы, давление и относительная влажность, температура водной среды на различных глубинах, волно-

графические измерения, фотосъёмка состояния атмосферы и поверхности моря). Подробнее об экспериментах можно найти в работах (Кузьмин и др., 2009, 2015; Сазонов и др., 2014).

В экспериментах используются микроволновые радиометры с рабочей длиной волны от 3 до 80 мм, включая два радиометра-поляриметра 8-мм диапазона (Анискович и др., 2016). Оба радиометра разработаны в ИКИ РАН и представляют собой приёмники прямого усиления с центральной частотой 36,0 ГГц, полосой 2 ГГц и четырьмя поляризациями (вертикальная, горизонтальная и $\pm 45^\circ$). Изменение поляризации осуществляется вращателем с использованием эффекта Фарадея. Радиометры не имеют системы внутренней калибровки, соответственно, изменение их показаний при смене условий работы (в первую очередь, температурный дрейф параметров) должно быть скомпенсировано в ходе часто реализуемой операции внешней калибровки (Степаненко и др., 1987).

Традиционно применяемый в полевых условиях метод калибровки основан на использовании нисходящего излучения атмосферы (наклонная или tipping калибровка). Его суть заключается в периодически повторяемых измерениях нисходящего радиотеплового излучения атмосферы при различных углах наклона антенны (Han, Westwater, 2000), которые дополняются измерениями излучения «горячей» согласованной нагрузки (эквивалент абсолютно чёрного тела (АЧТ)) с известными параметрами (термодинамической температурой и коэффициентом излучения), что позволяет получить несколько сильно различающихся уровней яркостной температуры, необходимых для выполнения операции калибровки.

Цель настоящей работы заключается в описании основных этапов процедуры наклонной калибровки, реализуемых коллективом авторов в натуральных исследованиях, и возникающих сложностей, выявленных в результате многолетнего опыта в обработке экспериментальных данных. Также представлены два варианта её исполнения: «итерационный» и на основе поиска опорного «холодного» источника радиоизлучения.

Используемая модель атмосферы

Одним из этапов наклонной калибровки (детально данная операция будет описана позднее) является расчёт нисходящего излучения атмосферы $T_{\text{ЯАТМ}}$. Очевидно, что чем точнее привлекаемая модель её излучения, тем точнее могут быть определены коэффициенты калибровочной шкалы радиометрического приёмника. Современные модели формирования и переноса излучения в атмосфере достаточно сложны и громоздки. Они определяют поглощение и излучение в разных слоях атмосферы с учётом вариаций концентрации различных газовых составляющих, наличия частиц гидрометеоров, аэрозолей, с учётом вертикальных профилей влажности и температуры (Rosenkranz, 1998). Такие модели точны, однако требуют знания большого числа физико-химических параметров атмосферы, а также привлечения существенных вычислительных ресурсов. Очевидно, что в рамках натурального эксперимента удовлетворение указанных требований оказывается невозможным.

Поэтому для решения задачи калибровки радиометрических приёмников обычно применяется упрощённая модель однородной плоской атмосферы, в которой нисходящее излучение атмосферы является функцией трёх параметров: некоторой эффективной температуры атмосферы, её интегрального поглощения (на выделенной частоте) и угла зондирования θ :

$$T_{\text{ЯАТМ}}(\theta) = T_{\text{ЭФ}} \left[1 - \exp(-\tau/\cos\theta) \right] + T_{\text{ХК}} \cdot \exp(-\tau/\cos\theta), \quad (1)$$

где $T_{\text{ЭФ}}$ — эффективная температура атмосферы в Кельвинах, $T_{\text{ЭФ}} = (T_0 - 10) + 273,15$, T_0 — термодинамическая температура приземного слоя атмосферы в градусах Цельсия; τ — интегральное поглощение атмосферы на выделенной частоте; $T_{\text{ХК}}$ — яркостная температура излучения холодного космоса, равная 2,73 К. Обоснование и границы применимости данного приближения можно найти, например, в публикации (Рис, 2006).

Результаты анализа показывают, что расчёты радиоизлучения атмосферы, выполненные по представленной выше модели однородной плоской атмосферы, сходятся с данными моделирования, проведённого в соответствии с работой (Rosenkranz, 1998) (при использовании

в последней усреднённых профилей температуры и влажности). Как показано на *рис. 1*, разница в оценках излучения атмосферы на частоте 36 ГГц в диапазоне углов 0–80° не превышает 0,7 К, что для задачи калибровки радиометра является приемлемым.

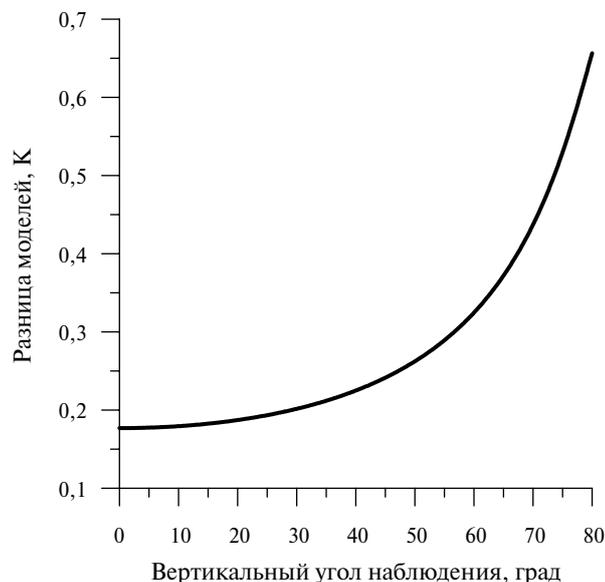


Рис. 1. Разница в радиояростной температуре излучения атмосферы между расчётами по модели однородной плоской атмосферы и модели, представленной в работе (Rosenkranz, 1998). Профили температуры и влажности атмосферы являются усреднёнными для осени в регионе, соответствующем месту проведения эксперимента

Итерационный вариант наклонной калибровки

В радиометрических приёмниках преобразование принятого излучения в напряжение на его выходе осуществляется с помощью квадратичного детектора (Фалин, 1997). Режим работы детектора выбирается так, чтобы весь диапазон измеряемых сигналов находился на максимально линейном участке. Таким образом, передаточная функция радиометра является линейной (максимально приближенной к линейной) и описывается соотношением: $y(x) = ax + b$, где x — измеренное напряжение на выходе квадратичного детектора радиометра (в виде кодов аналого-цифрового преобразователя (АЦП)); a и b — коэффициенты линейной аппроксимации калибровочной шкалы. Таким образом, задача калибровки радиометра сводится к поиску коэффициентов a и b . Для их однозначного и достоверного определения необходимо иметь две достаточно разнесённые опорные точки в виде измеренного излучения от опорных источников с известной радиояростной температурой.

В экспериментах на океанографической платформе (Кузьмин и др., 2009, 2015; Сазонов и др., 2014) в качестве опорных «горячих» эталонов используются термостабилизированные согласованные нагрузки с температурой 323,0 и 286,5 К и коэффициентом излучения на центральной частоте радиометра, равным 0,965. Для получения «холодной» опорной точки необходима нагрузка с температурой, отличающейся от горячих эталонов на максимально возможное значение. Использовать для этих целей традиционный метод охлаждения жидким азотом в полевых условиях невозможно. Поэтому вместо «холодной» нагрузки используются дискретные по углу измерения нисходящего излучения атмосферы. В экспериментах среди метеопараметров измеряется температура воздуха T_0 , поэтому радиояростная температура атмосферы $T_{я\text{АТМ}}$ может быть рассчитана с помощью формулы (1), если задаться некоторым значением интегрального поглощения τ .

В данной постановке калибровка экспериментальных измерений радиометра сводится к итерационному поиску набора значений a , b и τ , для которых минимизируется функция невязки между модельной угловой зависимостью яркостной температуры атмосферы (1), дополненной расчётными значениями яркости горячих нагрузок с одной стороны, и результатами непосредственных измерений тех же величин, представленных в кодах АЦП и преобразованных в яркостные температуры на основе сгенерированных коэффициентов калибровочной прямой, с другой (Сазонов, Садовский, 2010, 2012).

Среди недостатков подобной реализации метода наклонной калибровки стоит выделить следующие: существенные временные затраты на поиск решения и их зависимость как от выбранного метода генерации, так и от степени близости атмосферы к состоянию «безоблачная» и «однородная»; зависимость результатов поиска от выбранного начального приближения, установленных диапазонов поиска и заданных порогов точности искомых величин (ввиду наличия локальных минимумов минимизируемой функции); существенное влияние человеческого фактора в силу необходимости настройки алгоритма поиска и контроля процесса поиска оператором.

Алгоритм поиска холодной точки для калибровки

В уравнении (1) интегральное поглощение τ также называют оптической толщиной атмосферы при распространении луча вертикально, которая, в соответствии с работой (Рис, 2006), связана с высотой z соотношением:

$$\tau = \int_{H_{\min}}^{H_{\max}} \gamma(h) dh, \quad (2)$$

где γ — коэффициент поглощения на выделенной частоте в слое атмосферы dh ; H_{\min} и H_{\max} — высота точки наблюдения и верхнего края атмосферы над уровнем моря соответственно.

Если атмосфера однородна, а это было введено вместе с уравнением (1), то $\gamma(h) = \text{const}$, а τ меняется прямо пропорционально толщине слоя атмосферы. Таким образом, если точку наблюдения поднимать над поверхностью вплоть до верхней границы атмосферы ($H_{\min} \rightarrow H_{\max}$), то оптическая толщина τ будет линейно стремиться к нулю.

При наклонном зондировании атмосферы с поверхности Земли (под углом θ к зениту) оптическая толщина возрастает с коэффициентом $1/\cos(\theta)$ по отношению к её значению для вертикального луча (отсюда данный коэффициент появляется в соотношении (1)):

$$\tau_{sl} = \frac{1}{\cos(\theta)} \int_{H_{\min}}^{H_{\max}} \gamma(h) dh = \frac{1}{\cos(\theta)} \cdot \tau. \quad (3)$$

Формула (3) обладает достаточной точностью для значений θ менее 75° (угол зондирования атмосферы отсчитывается от зенита), при которых коэффициент $1/\cos(\theta)$ не превышает 4. При больших углах уже необходимо учитывать кривизну Земли. В рамках описываемых в работе натуральных экспериментов данное ограничение на величину угла не нарушается, поскольку существует дополнительное, обусловленное реальной диаграммой направленности антенны радиометра (осесимметричная рупорная антенна с корректировкой фазового фронта). Она обладает достаточно большой шириной (порядка 8° по уровню половинной мощности), и при настильных углах визирования в поле зрения прибора начинают попадать элементы береговой линии и водная поверхность.

Для дальнейших пояснений требуется введение понятия коэффициент оптической толщины K , который косвенно уже встречался выше. Определим его как отношение действующей оптической толщины, определяемой конкретной геометрией эксперимента, к некоторому базовому значению интегрального поглощения атмосферы τ_0 , получаемому по соотношению (2) при $H_{\min} = 0$:

$$K(H_{\min}, \theta) = \frac{1}{\cos(\theta)} \int_{H_{\min}}^{H_{\max}} \gamma(h) dh \bigg/ \int_0^{H_{\max}} \gamma(h) dh. \quad (4)$$

Проведём мысленный эксперимент, состоящий из двух этапов и основанный на соотношениях (1)–(4). На первом этапе мы уменьшаем вертикальный угол зондирования атмосферы от некоторого начального значения (пусть 75°) до нуля (в зенит). Регистрируемая (рас-

считываемая в соответствии с выбранной моделью (1) на этом этапе яркостная температура (равно как и коды АЦП) будет линейной функцией коэффициента оптической толщины, который в данном случае оказывается равным $1/\cos(\theta)$ (рис. 2, участок функции для области определения $K \geq 1$). На втором этапе, сохраняя ориентацию радиометра в зенит, мы начинаем поднимать прибор над поверхностью Земли (увеличивать H_{\min}) вплоть до верхней границы атмосферы. В этой ситуации угловые составляющие исчезают ($1/\cos(\theta) = 1$), а уменьшение слоя атмосферы, в котором формируется излучение, также будет приводить к линейной форме зависимости яркости (1) от коэффициента оптической толщины (4) (см. рис. 2, участок функции для области определения $0 \leq K < 1$). Достигнув верхнего слоя атмосферы, оптическая толщина по формуле (2) становится равной нулю, а экспонента в соотношении (1) — единице. Измеряемая яркостная температура $T_{\text{ЯАТМ}}$, в свою очередь, должна стать равной температуре космического излучения $T_{\text{ХК}}$. Как следствие — имеется возможность получить «виртуальную» калибровочную холодную точку с известной температурой излучения (недостижимой в обычных условиях на Земле) и соответствующим ей откликом радиометра (коды АЦП).

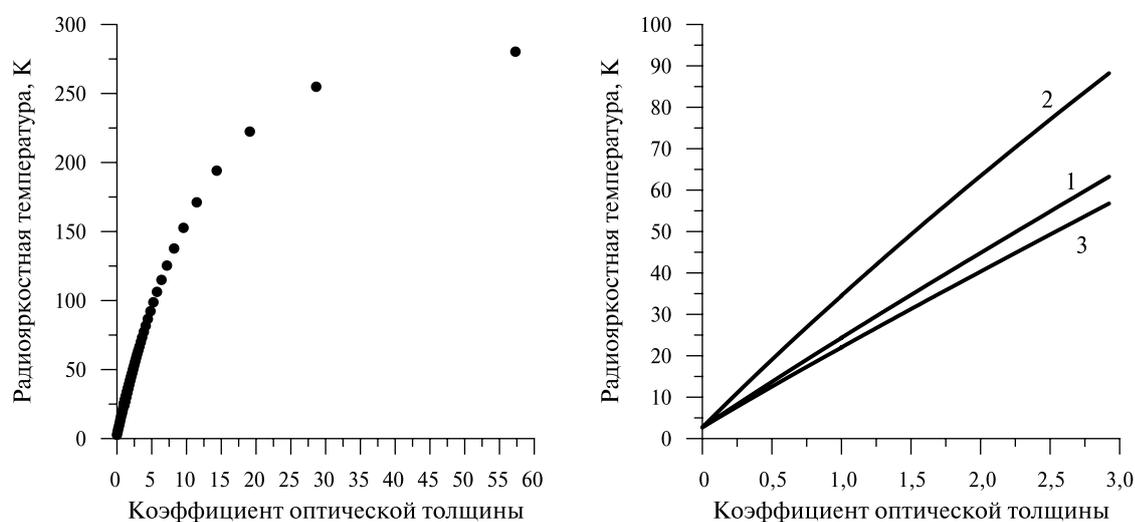


Рис. 2. Модельный расчёт радиояркостной температуры атмосферы в зависимости от коэффициента оптической толщины для трёх наборов данных (τ ; T_0) (справа): 1 — (0,08; 20), 2 — (0,12; 20) и 3 — (0,08; -10), для случая 1 в полном диапазоне коэффициентов оптической толщины (слева)

Следует отметить несколько важных моментов. Во-первых, область значений получаемой функции яркости/кодов АЦП обоих этапов описанного эксперимента представляет собой две части одной и той же прямой. Соответственно, определив экспериментально параметры прямой на одном из них, можно распространить их и на второй участок. Во-вторых, линейность сохраняется в достаточно широком диапазоне параметров атмосферы (τ и $T_{\text{ЭФ}}$) и углов наблюдения θ , как показано на примере модельных расчётов на рис. 2 (и подтверждается результатами, приведёнными в работах (Рис, 2006; Han, Westwater, 2000)). Расчёты выполнены в рамках приближения (1) для зависимости $T_{\text{ЯАТМ}}$ от коэффициента оптической толщины атмосферы для трёх наборов (τ ; T_0). При этом очевидно, что выход за пределы допустимости самой модели (1) (к которым относятся $K < 4$, горизонтальная однородность, общая малость τ на выделенной длине волны излучения), а также сильная вертикальная неоднородность γ будут приводить к возникновению существенной нелинейности зависимости $T_{\text{ЯАТМ}}(K)$ и, как следствие, нарушать логику приведённых рассуждений. В-третьих, вариации модельных параметров атмосферы (в уже оговорённых пределах) изменяют лишь наклон получаемой прямой, не затрагивая расположение холодной точки (см. рис. 2).

В натурном эксперименте измерения проводятся с высоты уровня моря, поэтому минимальный коэффициент оптической толщины, при котором выполняются измерения, будет

составлять единицу (измерения в зенит) (рис. 3). На основании приведённых выше рассуждений, в рамках линейности калибровочной функции радиометра и линейной зависимости измеряемой радиояркой температуры от коэффициента оптической толщины, можно полученные значения кодов АЦП радиометра (чёрные крестики на рис. 3) экстраполировать в область нулевого значения коэффициента оптической толщины.

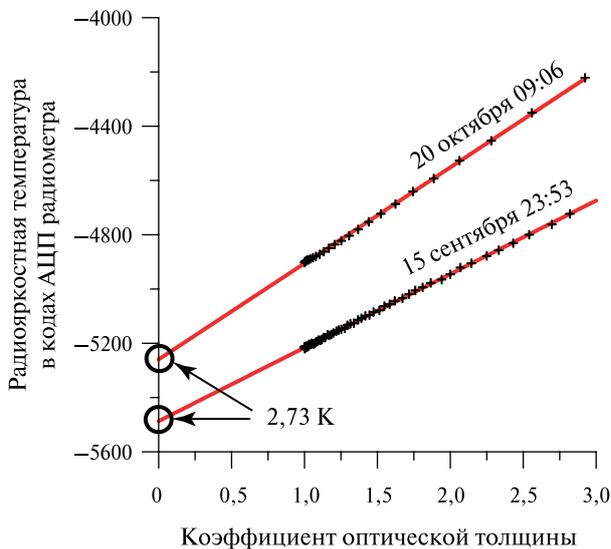


Рис. 3. Натурные измерения радиояркой температуры атмосферы в зависимости от коэффициента оптической толщины для двух калибровок в разные дни. Эксперимент 2019 г. Кресты — экспериментальные данные, линия — аппроксимация. Разное пересечение аппроксимации с осью ординат свидетельствует об изменении коэффициента усиления радиометра

Место пересечения рассматриваемой прямой с осью ординат даст значение кодов АЦП, которое могло бы быть измерено при отсутствии атмосферы и наблюдении излучения холодного космоса. Таким образом, найденное значение кодов АЦП будет соответствовать радиояркой температуре в 2,73 К, что и является искомой холодной точкой для калибровки радиометра. На рис. 3 приведены два случая выполнения калибровки: один — в начале эксперимента и один — в конце. За время измерений (более месяца) коэффициент усиления радиометра изменился, что и привело к разному уровню наклона калибровочной прямой.

Калибровка радиометра в ходе натуральных экспериментов

Как было отмечено ранее, для выполнения внешней калибровки радиометра с учётом линейности его калибровочной шкалы необходимо провести измерения интенсивности излучения двух эталонных источников, яркостная температура которых существенно различается.

В качестве горячих эталонов в натуральных экспериментах коллективом авторов используются термостабилизированные согласованные нагрузки с температурой 323,0 и 286,5 К, аналогичные представленным на рис. 4 (см. с. 46) и оптимизированные на длину волны 8 мм. Технология поиска холодной калибровочной точки описана в предыдущем разделе.

Для выполнения калибровки каждые 20 мин реализуется последовательное наведение радиометров на каждую из согласованных нагрузок (см. рис. 4) с последующим сканированием небосвода в диапазоне вертикальных углов 0–75° от зенита. Эта последовательность включается в программу автоматических измерений вне зависимости от основной программы реализации эксперимента. Это позволяет отслеживать динамические изменения характеристик прибора (рис. 5, см. с. 46), вызванные сменой внешних условий (изменение температуры воздуха, повышение влажности, охлаждение в результате интенсивного ветрового воздействия, нагрев при освещении солнцем и т. п.). Кроме этого, если данные визуальных наблюдений свидетельствуют о горизонтальной неоднородности атмосферы (например, появление лёгкой неравномерной облачности или дымки), в программу калибровки включаются дополнительные измерения, выполняемые на различных азимутах и охватывающие почти всю верхнюю полусферу.

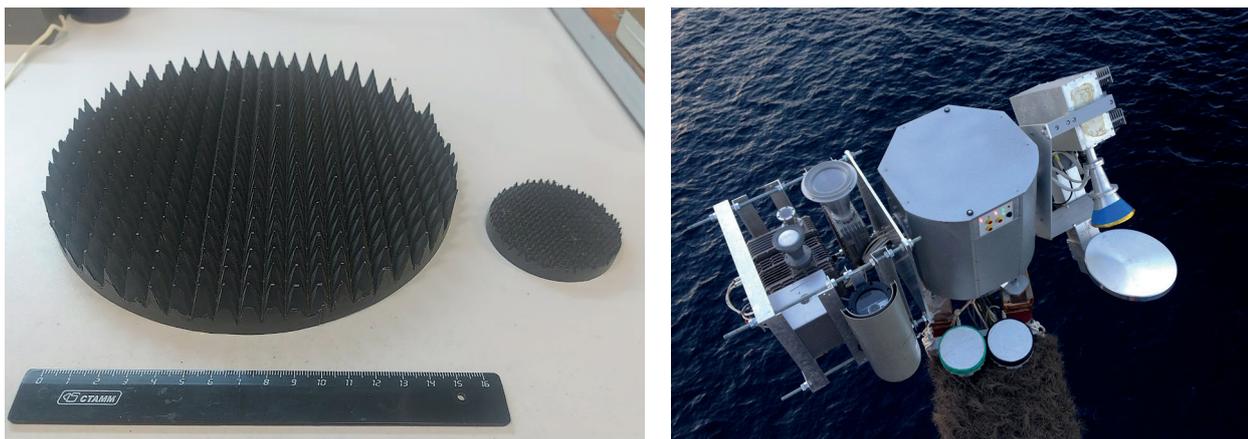


Рис. 4. Внешний вид модельных АЧТ, выполненных в виде набора графитовых пирамидальных элементов, используемых для калибровки радиометрических приёмников (слева). Автоматическая сканирующая платформа «Траверс-2» (Кузьмин и др., 2015) в момент проведения калибровочных измерений (справа). Два белых круга в нижней части изображения — термоизоляционные защитные крышки экспедиционных АЧТ

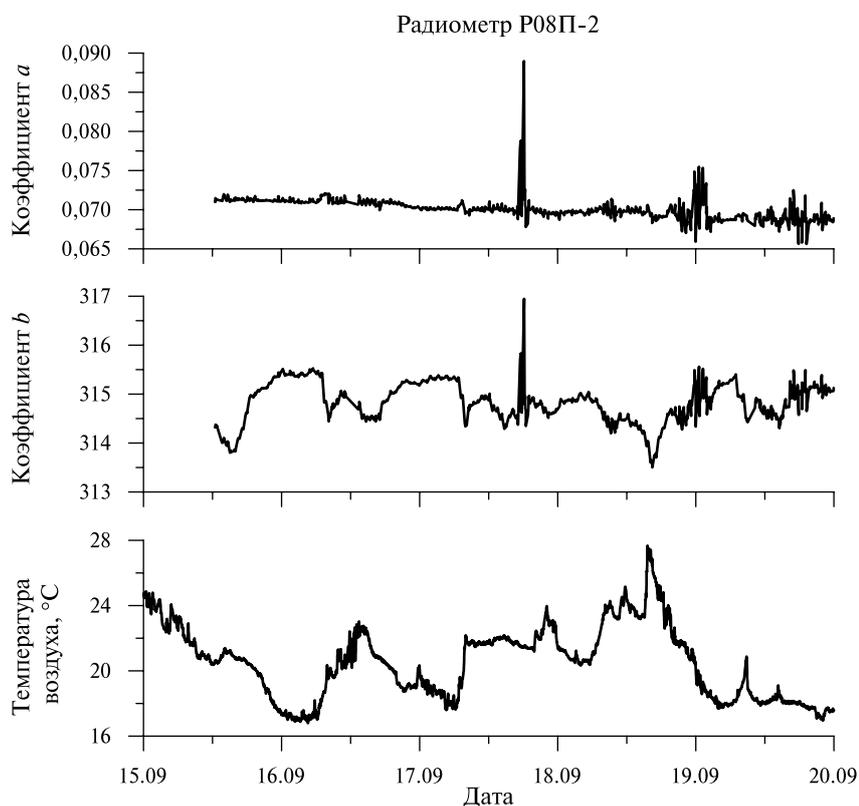
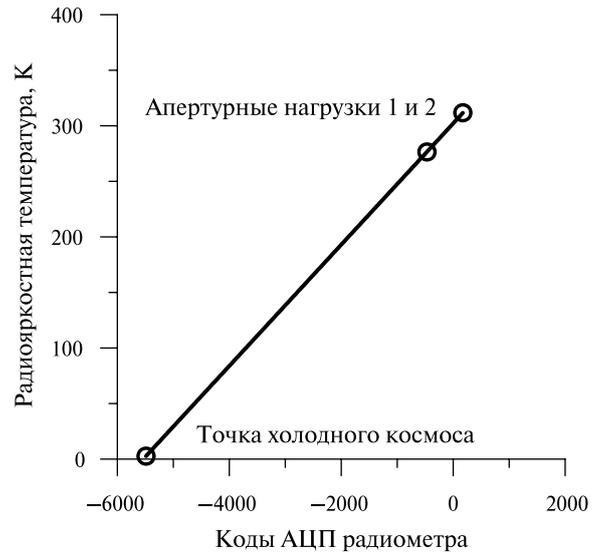


Рис. 5. Пример суточных вариаций термодинамической температуры приземного слоя атмосферы (снизу) и отклика на них характеристик радиометрического приёмника через изменяющиеся параметры калибровочной шкалы (сверху, посередине). Резкие изменения значений калибровочных коэффициентов соответствуют дождевым условиям, когда используемая модель атмосферы не удовлетворяет ограничениям на её применимость

Результаты калибровочных измерений двух горячих нагрузок и холодной точки (в виде трёх пар координат (яркостная температура; коды АЦП)) наносятся на координатную плоскость, как показано на рис. 6 (см. с. 47). После этого подбирается их оптимальная линейная аппроксимация, являющаяся искомой калибровочной шкалой радиометра.

Рис. 6. Экспериментально определённая калибровочная прямая по трём опорным источникам излучения

Использование двух горячих калибровочных эталонов вместо одного (достаточного для определения параметров калибровочных коэффициентов) позволяет уменьшить ошибки калибровки, вызванные случайными отклонениями регистрируемых для них значений кодов АЦП, а также возможным запаздыванием реакции их термостабилизирующих элементов на изменяющиеся внешние условия (этот подход наиболее эффективно работает при условии противоположности знаков разницы их опорной термодинамической температуры с температурой окружающей среды). Помимо этого при использовании трёх опорных точек имеется возможность оценки качества подбора калибровочных коэффициентов через расчёт среднеквадратичного отклонения измеренных и подобранных значений.



Найденные калибровочные коэффициенты используются для пересчёта измеряемых кодов АЦП в радиояркостную температуру (в рамках решения основных задач натурального эксперимента). Эти коэффициенты считаются актуальными в течение 20 мин, вплоть до выполнения следующего цикла калибровочных измерений.

Сравнение результатов работы двух вариантов реализации метода наклонной калибровки, описанных в настоящей работе, представлено на рис. 7 в виде диаграмм разброса соответствующих параметров. Коэффициент корреляции составляет практически 1, следовательно, калибровка по холодному эталону идентична итерационному варианту наклонной калибровки. Имеющийся разброс точек появляется в результате применения разных алгоритмов в режиме автоматической обработки данных, в которые входят и данные, полученные при дождевых условиях. Именно при дождевых условиях разные алгоритмы оценивают калибровочные коэффициенты по-разному.

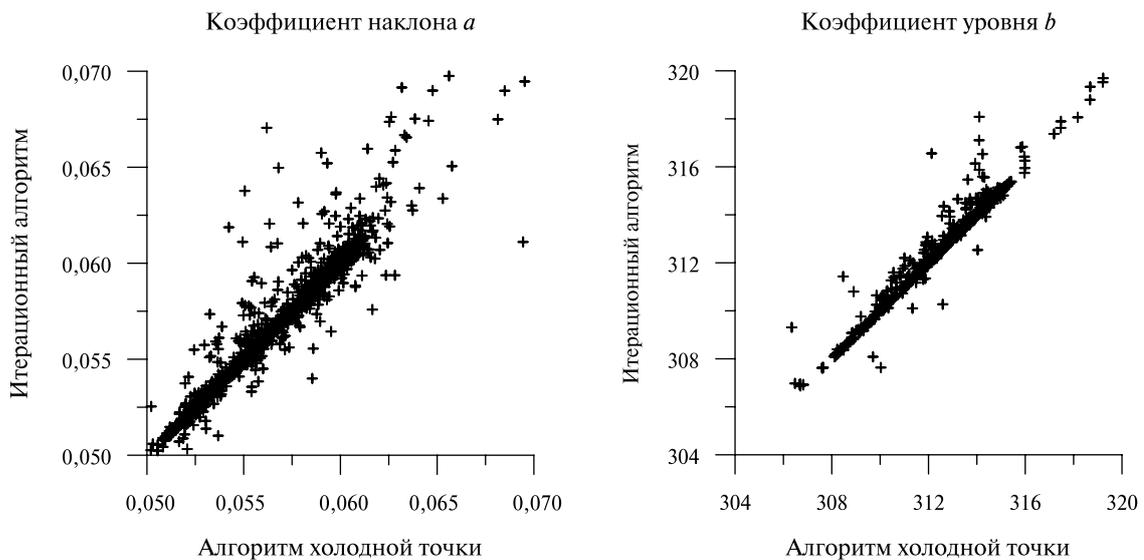


Рис. 7. Диаграммы рассеяния между калибровочными коэффициентами a и b , полученными по рабочему итерационному алгоритму и с использованием алгоритма холодной точки

При этом вариант поиска холодной точки позволяет многократно снизить вычислительные затраты (что даёт возможность выполнять калибровку радиометров непосредственно в ходе экспериментальных работ, в онлайн-режиме), не требует априорного знания температуры приземного слоя атмосферы (потенциальный источник дополнительных ошибок) и подбора величины её интегрального поглощения.

Заключение

В настоящей работе представлено детальное описание метода наклонной внешней калибровки радиометрических приёмников, используемых коллективом авторов при проведении натуральных экспериментов. Изложено два варианта его реализации: итерационный, традиционно используемый в условиях ограничений полевых измерений, и его развитие — через поиск виртуальной холодной калибровочной точки.

В основе второго подхода лежит линейная зависимость нисходящего излучения атмосферы от коэффициента её оптической толщины, дополненная линейностью передаточной функции радиометра. Приведённые в тексте работы соотношения и результаты модельных расчётов подтверждают состоятельность используемых приближений. Представленные результаты свидетельствуют о возможности нахождения опорного холодного эталона с интенсивностью излучения, недостижимого в земных условиях. Показано как теоретически, так и на основе экспериментальных данных, что при любых сочетаниях физической температуры приземного слоя атмосферы и величины её интегрального поглощения (допустимых в рамках привлекаемой модели плоской однородной атмосферы) прямые линии зависимости интенсивности излучения атмосферы от коэффициента оптической толщины сходятся в одной точке (при $K = 0$). Соответственно, вариант калибровки по холодному эталону не требует априорного знания этих величин.

Ограничения подхода логично вытекают из пределов применимости самой модели плоской однородной атмосферы: значения коэффициента оптической толщины $K < 4$, горизонтальная однородность, общая малость τ на выделенной длине волны излучения, вертикальная однородность распределения погонного поглощения.

Сравнение результатов работы двух вариантов реализации метода наклонной калибровки показывает практически полное совпадение их результатов. При этом вариант поиска холодной точки позволяет многократно снизить вычислительные затраты, что обеспечивает возможность оценки калибровочной шкалы в онлайн-режиме.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (тема «Мониторинг», госрегистрация № 122042500031-8).

Литература

1. Анискович В. М., Кузьмин А. В., Сазонов Д. С., Хайкин В. Б. Радиометр-поляриметр диапазона 0,8 см для натуральных и лабораторных измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 213–223. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-213-223.
2. Кузьмин А. В., Горячкин Ю. А., Ермаков Д. М., Ермаков С. А., Комарова Н. Ю., Кузнецов А. С., Репина И. А., Садовский И. Н., Смирнов М. Т., Шарков Е. А., Чухарев А. М. Морская гидрографическая платформа «Кацивели» как подспутниковый полигон на Черном море // Исслед. Земли из космоса. 2009. № 1. С. 31–44.
3. Кузьмин А. В., Репина И. А., Садовский И. Н., Селунский А. Б. Микроволновые радиометрические исследования морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 76–97.
4. Рис У. Г. Основы дистанционного зондирования. М.: Техносфера, 2006. 336 с.
5. Садовский И. Н., Сазонов Д. С. Оценка влияния асимметрии крупных волн на собственное излучение морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 6. С. 331–343. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-331-343.

6. Садовский И. Н., Кузьмин А. В., Поспелов М. Н. и др. Экспериментальные исследования коротковолновой части спектра ветровых волн. Предварительный анализ результатов дистанционных радиометрических измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 5. С. 55–67.
7. Сазонов Д. С., Садовский И. Н. Калибровка как часть обработки экспериментальных радиополяриметрических измерений // Материалы 8-й Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2010. С. 232.
8. Сазонов Д. С., Садовский И. Н. Использование метода наименьших квадратов и последовательных приближений для ускорения калибровки СВЧ-радиометра // Материалы 10-й Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2012. С. 66.
9. Сазонов Д. С., Дулов В. А., Садовский И. Н., Чечина Е. В., Кузьмин А. В. Подспутниковые измерения асимметрии уклонов ветровых волн гравитационного диапазона // Украинский метролог. журн. 2014. № 1. С. 54–58.
10. Сазонов Д. С., Садовский И. Н., Кузьмин А. В., Пашинов Е. В. Натурные исследования угловых зависимостей третьего параметра Стокса излучения морской поверхности на частоте 37 ГГц // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 6. С. 309–319. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-309-319.
11. Степаненко В. Д., Щукин Г. Г., Бобылев Л. П., Матросов С. Ю. Радиотеплолокация в метеорологии. Л.: Гидрометеоиздат, 1987. 283 с.
12. Фалин В. В. Радиометрические системы СВЧ. М.: Луч, 1997. 440 с.
13. Rosenkranz P. W. Water vapor microwave continuum absorption: A comparison of measurements and models // Radio Science. 1998. V. 33. Iss. 4. P. 919–928. DOI: 10.1029/98RS01182.
14. Han Y., Westwater E. R. Analysis and improvement of tipping calibration for ground-based microwave radiometers // IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2000. V. 38. No. 3. P. 1260–1276. DOI: 10.1109/36.843018.

Tipping calibration of radiometric receiver in natural conditions

D. S. Sazonov, I. N. Sadovsky, E. V. Pashinov, A. V. Kuzmin

*Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: sazonov_33m7@mail.ru*

The paper is devoted to description and comparison of two variants of tipping calibration method implementation carried out on the basis of analysis of the angular dependence of downward radiation of the atmosphere. Calibration is used to establish a one-to-one correspondence between the signal at the radiometer output and the radiation intensity of the medium. Both methods (“iterative” and the variant of searching for a reference “cold” source of radio emission) allow performing the specified operation during implementation of full-scale experimental studies. The discussed calibration methods can be used only in the approximation of a flat single-layer atmosphere, which naturally imposes a limitation on acceptable meteorological conditions at the point of the experiment, as well as on the range of zenith measurement angles involved in this operation. The basis of the iterative algorithm, traditionally used by the authors when processing full-scale data, is the pseudo-random generation of both a set of meteorological parameters included in the atmospheric radiation model and directly the values of the calibration coefficients of the radiometric receiver, ensuring minimization of the residual function of the calculated values of sky brightness and the experimentally measured ones. The variant of searching for the reference cold source of radio emission is based on the linearity of the dependence of atmospheric radiation on its optical thickness coefficient together with the linearity of the radiometer transfer function. On the basis of the angular dependence of atmospheric brightness, this allows searching (within the approximations used) for a point on the calibration line that would correspond to measurements of the cold space radiation (hence the conventional name of the method), which is fundamentally unattainable in terrestrial conditions. The substantive part of the work is devoted to a detailed description of both methods, the approximations and assumptions used in them, as well as consideration of the advantages and disadvantages of each. It is shown that the calibration method using a cold source of radiation is preferable due to its invariance to physical temperature of the atmosphere and

the possibility of on-line evaluation of calibration coefficients, with full coincidence with the results of the iterative approach.

Keywords: remote sensing, external calibration, radiometer, full-scale experiment, atmospheric model

The work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation (Monitoring, state registration No. 122042500031-8).

Accepted: 29.05.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-40-50

References

1. Aniskovich V. M., Kuzmin A. V., Sazonov D. S., Khaikin V. B., Radiometer-polarimeter at 0.8 cm for field and laboratory measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, V. 13, No. 2, pp. 213–223 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-213-223.
2. Kuzmin A. V., Goryachkin Yu. A., Ermakov D. M., Ermakov S. A., Komarova N. Yu., Kuznetsov A. S., Repina I. A., Sadovskii I. N., Smirnov M. T., Sharkov E. A., Chukharev A. M., Marine hydrophysical platform “Katsiveli” as a subsatellite test site in the Black Sea, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2009, No. 1, pp. 31–44 (in Russian).
3. Kuzmin A. V., Repina I. A., Sadovskii I. N., Selunsky A. B., Microwave radiometric studies of the sea surface, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, V. 12, No. 5, pp. 76–97 (in Russian).
4. Rees W. G., *Physical principles of remote sensing*, 2nd ed., Cambridge: Cambridge University Press, 2001, 343 p., DOI: 10.1017/CBO9780511812903.
5. Sadovskii I. N., Sazonov D. S., Estimation of large wave asymmetry influence on sea surface self-radiation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 6, pp. 331–343 (in Russian). DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-331-343.
6. Sadovskii I. N., Kuzmin A. V., Pospelov M. N. et al., Experimental research of short-wave part of wind-waves spectrum. Preliminary analysis of radiometric remote measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, V. 13, No. 5, pp. 55–67 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-5-55-67.
7. Sazonov D. S., Sadovskii I. N., Calibration as part of processing experimental radiopolarimetric measurements, *Materialy 8-i Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii “Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa”* (Proc. 8th All-Russia Open Conf. “Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space”), Moscow: IKI RAS, 2010, p. 232 (in Russian).
8. Sazonov D. S., Sadovskii I. N., Using least squares and successive approximations methods to speed up microwave radiometer calibration, *Materialy 10-i Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii “Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa”* (Proc. 10th All-Russia Open Conf. “Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space”), Moscow: IKI RAS, 2012, p. 66 (in Russian).
9. Sazonov D. S., Dulov V. A., Sadovskii I. N., Chechina E. V., Kuzmin A. V., Subsattelite measurements of slope asymmetry of gravitational wind waves, *Ukrainskii metrologicheskii zhurnal*, 2014, No. 1, pp. 54–58.
10. Sazonov D. S., Sadovskii I. N., Kuzmin A. V., Pashinov E. V., Field studies of the third Stokes parameter angular dependences of sea surface radiation at a frequency of 37 GHz, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 6, pp. 309–319 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-309-319.
11. Stepanenko V. D., Shchukin G. G., Bobylev L. P., Matrosov S. Yu., *Radioteplolokatsiya v meteorologii* (Radiothermal location in meteorology), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1987, p. 283 (in Russian).
12. Falin V. V., *Radiometricheskie sistemy SVCH* (Microwave radiometric systems), Moscow: Luch, 1997, p. 440 (in Russian).
13. Rosenkranz P. W., Water vapor microwave continuum absorption: A comparison of measurements and models, *Radio Science*, 1998, V. 33, Iss. 4, pp. 919–928, DOI: 10.1029/98RS01182.
14. Han Y., Westwater E. R., Analysis and improvement of tipping calibration for ground-based microwave radiometers, *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*, 2000, V. 38, No. 3, pp. 1260–1276, DOI: 10.1109/36.843018.