

ГЛАВА 6. КАЛИБРОВКА И ВАЛИДАЦИЯ

6.1 КАЛИБРОВКА ПРИБОРА

6.1.1 Введение

Калибровкой называется процесс количественного определения отклика спутникового прибора на известный, управляемый входной сигнал¹. Калибровочная информация содержится в калибровочной формуле или калибровочных коэффициентах, которые затем используются для преобразования выходного сигнала прибора («число интервалов дискретизации измеряемого сигнала», или прежде «аналоговые сигналы») в физические единицы (например, значение интенсивности излучения). Калибровка прибора очень важна для любой обработки данных высокого уровня, особенно для получения количественной продукции, либо когда необходимо объединить данные, полученные с помощью различных приборов (например, для получения комбинированного изображения). Для климатических применений требование в отношении проведения тщательной калибровки является особенно жестким², поскольку выявление незначительных трендов за продолжительные периоды требует возможности сравнения различных приборов, установленных в разное время на разных спутниковых системах. Построение однородных рядов климатических данных зависит от очень стабильной калибровки и характеристик погрешности.

Нижеприведенные факторы необходимо учитывать в равной мере при использовании пассивных и активных приборов.

Обычно следует рассматривать пять калибровочных областей: радиометрическую, спектральную, пространственную, временную и поляризационную. Исчерпывающий протокол калибровки должен включать оценки неопределенности в параметрах калибровки. Калибровка спутникового прибора должна учитывать все этапы жизни прибора: от его конструирования и предпускового этапа до этапов после запуска на орбиту и работы на орбите.

Взаимные сравнения приборов с общим эталонным прибором позволяют достичь совместимости результатов спутниковых измерений в заданной точке по времени. Главные центры численных прогнозов погоды (ЧПП) могут также оказывать помощь в определении соответствующих систематических погрешностей сравниваемых приборов путем сопоставления в системах усвоения данных смоделированных и наблюдаемых спутниковых данных об интенсивности излучения. Калибровка по эталону, воспроизводящему единицу физической величины абсолютным методом, тем не менее, необходима для достижения единообразия погрешностей и выявления любого однозначного долговременного дрейфа.

Калибровка с использованием хорошо изученных стабильных целей на Земле (называемая косвенной калибровкой) является резервным вариантом, когда спутниковый прибор нельзя напрямую сравнить с согласованным образцовым эталоном³, например из-за отсутствия на борту надежного калибровочного устройства. Ряды данных наблюдений, полученных в прошлом с помощью приборов предыдущих поколений, могут быть фактически вновь откалиброваны, если станет доступной дополнительная информация о состоянии этих приборов, например посредством сопоставления с вторично обработанными и хорошо изученными историческими рядами наблюдений.

¹ По определению, принятому Рабочей группой по калибровке и валидации Комитета по спутниковым наблюдениям за Землей (КЕОС). (Термины, представленные в настоящем томе, отличаются в некоторых случаях от терминов, установленных в ОКРМ, 2012).

² См. например, Ohring (2007).

³ Для руководства в отношении эталонов см., например, Fox (2010).

6.1.2 Факторы, влияющие на калибровку

Чувствительность прибора к входному сигналу, т. е. соотношение между интенсивностью излучения, которой подвергается прибор, и численным значением конкретного результата измерения (в физических единицах, например Вт·м⁻²), зависит от нескольких факторов, таких как:

- a) геометрия обзора, экранирующие эффекты, засветка и диаграмма направленности антенны;
- b) чувствительность и эксплуатационное изнашивание детектора;
- c) фильтрующая оптика, а также возможное загрязнение и устойчивость состояния фильтра;
- d) температура всех частей прибора, включая фронтальную оптику, детектор и электронику внутреннего интерфейса (электроника фокальной плоскости, предварительный усилитель и др.);
- e) система обработки сигнала (коэффициент усиления, аналогово-цифровой преобразователь и др.).

Все эти факторы важны для определения спектральной характеристики и аппаратной функции оптического прибора, которые характеризуют прибор соответственно с радиометрической и оптической точек зрения. Они должны быть смоделированы перед запуском и отслеживаться во время работы на орбите на основе совокупности внутренних измерений на борту спутника (проверка бортовых систем). Модель прибора и система проверки бортовых систем важны для понимания состояния прибора и тенденции его работы, а также для предварительной оценки и корректировки систематических погрешностей. Тем не менее, как правило, невозможно описать аналитическими средствами точное изменение чувствительности прибора, являющееся следствием всех этих факторов. Контрольные измерения являются обязательными для получения характеристик фактической калибровки.

6.1.3 Предпусковая калибровка

Предпусковая калибровка прибора проводится в лаборатории с использованием точно известных источников радиации в контролируемых условиях. Очень важно смоделировать все возможные состояния прибора и стресс-факторы до запуска на орбиту, поскольку это единственный способ точно охарактеризовать и смоделировать поведение прибора перед тем, как он будет подвержен суровому воздействию космической среды в жестких условиях внешней среды орбитального полета. Необходимо обеспечить надежную работу системы проверки бортовых систем и самого прибора, способных выдержать физический стресс на этапах запуска, введения в строй и эксплуатации в течение всего периода полета. Данные, полученные по результатам проверки бортовых систем, в сочетании с информацией о калибровке после запуска прибора позволят операторам в дальнейшем судить о состоянии прибора на орбите и решать нештатные ситуации, возникающие в процессе работы на орбите.

6.1.4 Бортовая калибровка

Бортовая калибровка позволяет проводить мониторинг работы (и стабильности работы) прибора на орбите. Она осуществляется с использованием эталонных целей (таких как абсолютно черное тело в инфракрасном диапазоне спектра, диффузоры солнечного света и ламповые линейные источники излучения в коротковолновом диапазоне спектра) для пассивных приборов или встроенных калибровочных систем (таких как мониторы усиления спектра) для активных приборов. Некоторые унаследованные приборы давно работают без использования адекватных способов проведения бортовой калибровки,

такие как AVHRR, который обеспечивает получение многолетних рядов наблюдений в видимой и ближней инфракрасной областях спектра. Для получения характеристик таких приборов необходимо использовать другие способы калибровки (например, косвенную калибровку, взаимное сравнение). Точность калибровки прибора, работающего на орбите, определяется стабильностью бортовых калибровочных систем на протяжении всего времени эксплуатационного ресурса прибора. Поэтому и сама калибровка обязательно должна проверяться путем проведения взаимных сравнений с высокоточным контрольным прибором.

В случае с приборами для измерения инфракрасного излучения, когда допускается, что детекторы радиометров имеют линейную характеристику чувствительности, напряжение на выходе определяется формулой:

$$V = \alpha R + V_0$$

где R — входящая энергетическая яркость, α — чувствительность радиометра и V_0 — системная погрешность. Калибровка состоит из определения α и V_0 , которое осуществляется путем экспонирования радиометра минимум на две эталонные мишени с сильно различающимися температурами яркости.

Для приборов для измерения инфракрасного и микроволнового излучения одной эталонной целью является глубокое космическое пространство с температурой 2,725 К. Для приборов на спутниковой платформе не всегда имеется возможность направить прибор в сторону глубокого космоса. Например, приборы, использующие схему «pushbroom» и всегда нацеленные в сторону поверхности Земли, необходимо оснастить вспомогательным зеркалом для обеспечения обзора глубокого космоса с определенной периодичностью. Второй целью обычно является хорошо изученный источник с температурой в средней части и до верхнего уровня динамического диапазона, чаще всего это абсолютно черное тело, которое идеально сопоставимо с Международной системой единиц (СИ), т. е. шкалой энергетической яркости, предоставляемой национальным метрологическим учреждением.

Если чувствительность прибора не линейная по всему динамическому диапазону, это необходимо учитывать при снятии предпусковых характеристик прибора, например, используя квадратичную функцию или применяя спрямления в различных частях динамического диапазона и возможное добавление второго абсолютно черного тела с другой температурой.

Для приборов для измерения ультрафиолетового, видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектра бортовая калибровка является более сложной задачей, поскольку она подвержена влиянию многих факторов. Для экстремально слабых сигналов глубокое космическое пространство является подходящим эталоном для контрольного измерения при условии, что возмущающие эффекты (например, отражения от других частей спутника) отсутствуют. При очень сильных сигналах абсолютный источник обычно заменяется солнечными диффузорами, которые обеспечивают относительно стабильные характеристики для контрольного замера. Луна также может использоваться в качестве эталонной цели с тем преимуществом, что на нее можно смотреть без аттенюатора; однако она должна использоваться в сочетании с точной моделью яркости Луны. Ни солнечные диффузоры, ни Луна не обеспечивают калибровки абсолютным методом. Другой часто используемой системой является стенд ламповых линейных источников с хорошо контролируемой интенсивностью излучения. Также необходимо принимать во внимание воздействие спектрально-зависимой поляризации, вызванной влиянием отражающих поверхностей оптики прибора.

Другой проблемой при проведении бортовой калибровки является то, что во многих случаях структура измерительных средств не позволяет подвергнуть всю основную оптику облучению с помощью эталонных источников. Например, стабилизированный вращением радиометр на геостационарной орбите использует встроенное абсолютно черное тело, требующее моделирования с учетом вклада телескопа и периферийной оптики в фоновое

излучение. Часто эталонный источник облучает только какую-то часть оптики прибора и поэтому он больше используется для мониторинга устойчивости функционирования, чем для калибровки абсолютным методом.

6.1.5 Косвенная калибровка

Бортовая калибровка может быть дополнена стабильными наземными целями, используемыми в качестве образцовой мишени в процессе, называемом ретроспективная калибровка. С мишени необходимо тщательно снять все характеристики для того, чтобы сделать заключение в отношении испускаемого или отраженного излучения в космос. Обязательно надо принимать во внимание комбинированное воздействие геометрии обзора и, на коротких волнах, двулучевую функцию отражательной способности от земной поверхности и атмосферы. Радиационный перенос в атмосфере между спутником и наземным эталонным источником должен быть точно известен в момент прохождения спутника над этим источником. В случае отсутствия облачности коротковолновый спектр особенно подвержен воздействию аэрозолей, в то время как на длинноволновый спектр особенно оказывает влияние наличие водяного пара.

Для косвенной калибровки могут использоваться различные виды целей: поля полярного льда как абсолютно черное тело для микроволновых радиометров; снежные поля; солнечный свет; однородные районы пустыни; сильно конвективные вершины облаков для верхнего предела видимого динамического диапазона; поверхность океана при отсутствии облачности для темных целей в видимом диапазоне; отражатели из уголков куба для радара с синтезированной апертурой; влажный лес как абсолютно черное тело для рефлектометров и др. Калибровочные испытательные полигоны с проводимыми на них натурными наблюдениями используются для калибровки спутниковых приборов с высоким пространственным разрешением. Во время ввода в эксплуатацию полетной аппаратуры или через регулярные интервалы времени самолеты пролетают над целевым районом одновременно с прохождением над ним спутника, что позволяет получить дополнительные данные для ретроспективной калибровки.

6.1.6 Взаимная калибровка путем проведения одновременных наблюдений

Взаимная калибровка спутниковых приборов состоит из соответствующих измерений по одному прибору относительно измерений по другому прибору. Это делается с двумя целями:

- a) обеспечение косвенной калибровки приборов, у которых нет или неисправно встроенное калибровочное устройство (взаимная калибровка проводится по высококачественному, хорошо откалиброванному прибору, который служит эталоном);
- b) слияние данных, полученных с помощью нескольких приборов, для построения однородных временных рядов.

Взаимная калибровка приборов, работающих в течение одного периода времени, требует выверенного взаимного расположения (коллокации), при котором сигналы приборов на выходе сравниваются, когда приборы наблюдают один и тот же объект на Земле, в одно и то же время и под одинаковыми углами обзора. Одновременные наблюдения с коллокацией между формирователями изображений на ГСО и эталонным формирователем изображений с НОС выполняются ежемесячно уже в течение почти 30 лет в качестве средства нормализации изображений, получаемых с геостационарных спутников; это делается в рамках Международного проекта по спутниковой климатологии облаков (ИСККП) Всемирной программы исследований климата (ВПИК). Совсем недавно Глобальная космическая система взаимных калибровок (ГСИКС) разработала оперативную методологию для проведения таких взаимных калибровок, конкретно для одновременно проводимых скоординированных наблюдений. Эта методология оценивает выбор

оптимального соотношения между точным совместным пространственно-временным ориентированием приборов и частотой таких событий, и учитывает поправки, которые необходимо вводить для:

- a) различной геометрии обзора (с учетом как угла сканирования, так и положения прибора относительно Солнца);
- b) различного состояния атмосферы вдоль линии луча при сканировании, включая аэрозоли и облачность;
- c) различных функций спектральной чувствительности.

Следует отметить, что одновременные наблюдения между двумя спутниками на солнечно-синхронных орбитах могут проводиться только в точке пересечения их орбитальных плоскостей, которая всегда расположена в определенный момент по местному солнечному времени и на определенной, обычно на высокой северной или южной широте⁴.

6.1.7 **Корректировка систематической погрешности измерений в многолетних рядах наблюдений**

Другой метод взаимной калибровки приборов, который менее требователен к расчетам и применению апостериори к многолетним рядам данных, заключается в простом сравнении статистического распределения перекрывающихся рядов данных по двум рядам наблюдений со спутниковых приборов без применения сравнений результатов наблюдения отдельных объектов. Применение этого метода дает возможность определять относительную систематическую погрешность между двумя рядами наблюдений. Наблюденная систематическая погрешность анализируется таким образом, чтобы различные условия наблюдений (например, разное местное солнечное время) объясняли оставление остальной систематической погрешности в качестве той части, которая фактически приходится на разницу в калибровке приборов. Удачным примером применения такого метода служит взаимная калибровка девяти радиометров для микроволнового зондирования (МКР), установленных на борту ранних спутников Национального управления по исследованию океанов и атмосферы, которые предоставили 26-летние ряды наблюдений за глобальной температурой тропосферы.

6.1.8 **Использование калибровочной информации**

Тип имеющейся калибровочной информации зависит от уровня ее обработки и от рассматриваемого прибора. Каждый прибор имеет свой собственный рабочий режим и цикл калибровки, который включает в себя регулярные измерения калибровочных целей, каждый раз с выполнением определенного числа наблюдений. Для примера в таблице показаны циклы калибровки AMSU-A, микроволнового датчика влажности (МДВ) и инфракрасного датчика с высокой разрешающей способностью-4 (HIRS/4).

⁴ Для наклона в 98° широта пересечения составляет около 70°, когда ВПЭ двух орбит отличается меньше чем на 8 часов, и опускается значительно, когда разница в ВПЭ возрастает до 12 часов.

Примеры циклов наблюдений/калибровки

	<i>AMSU-A</i>	<i>МДВ</i>	<i>HIRS/4</i>
Число обзоров Земли	1 линия на 30 пикселей	1 линия на 90 пикселей	38 линий на 56 пикселей
Число обзоров теплой мишени	2 (~300 К)	4 (~273 К)	48 (~290 К)
Число обзоров холодной мишени	2 (глубокий космос ~2,73 К)	4 (глубокий космос ~2,73 К)	56 (глубокий космос ~2,73 К)
Общая длительность цикла	8 с	8/3 с	256 с

Важным шагом в предварительной обработке данных от уровня 0 до уровня 1b (см. 2.3.2.6, глава 2 настоящего тома) является извлечение калибровочной информации в виде подсчета теплых/холодных обзоров и затем расчет результирующих поверочных коэффициентов в соответствии с калибровочной моделью (такой как линейная или квадратичная калибровочная функция, таблица преобразования и др.), определенной оператором спутника для конкретного прибора. Это обеспечивает оперативную калибровку для данного прибора.

Для прикладных целей, требующих высокой точности и однородности рядов данных, полученных по различным приборам, может быть применена поправка дополнительно к оперативной калибровке для учета последних результатов проведения взаимной калибровки. Такие поправки предоставляются ГСИКС. Откорректированный калибровочный коэффициент может быть включен в уровень 1b/уровень 1,5 форматов данных как дополнительная калибровочная информация.

6.1.9 Сопоставимость результатов измерений из космоса

В то время как взаимная калибровка может обеспечить сопоставимость результатов измерений различными спутниковыми приборами, нет необходимости обеспечивать сопоставимость с СИ, кроме случаев, когда эталонный прибор на орбите является сопоставимым с СИ. Для достижения сопоставимости с СИ на орбите существуют большие проблемы, поскольку большинство датчиков деградируют физически в ходе и после запуска на орбиту. Достижение сопоставимости с СИ представляет собой проблему для конструкторов приборов и остается исследовательской темой для всех видов измерений, за исключением нескольких.

Программа наблюдения абсолютных значений энергетической яркости и рефракции для исследования климата, предложенная Национальным исследовательским советом США, включает космический аппарат с высокоточным инфракрасным радиометром с контрольным абсолютно черным телом с высокой излучательной способностью и с сопоставимой с СИ калибровкой термометра с многократно меняющимися фазу ячейками, а также со спектрометром с рабочим диапазоном в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном частях спектра, калибруемом по Солнцу и Луне, с криогенно охлаждаемым активном резонансном радиометром и датчиком радиозатменных измерений. Этот комплекс приборов должен обеспечивать полностью сопоставимые результаты измерений всего спектра, излучаемого Землей, и отраженного солнечного излучения. Осуществление запуска и поддержание работы такого аппарата предоставило бы опорную точку для поддержки калибровки и сопоставимости результатов работы всего парка оперативных радиометров.

Для сопоставимости результатов измерений следует воспользоваться преимуществами приборов, которые не зависят от радиометрической калибровки, таких как радиозатменные и солнечные либо звездно-затменные датчики (см. 2.2.4.3 и 2.2.5.1, глава 2 настоящего тома).

6.2 ПРОВЕРКА КАЧЕСТВА ПРОДУКЦИИ

6.2.1 Факторы, которые необходимо учитывать при проверке качества продукции

Проверкой качества продукции является процесс оценки с помощью независимых средств качества продукции на основе данных, полученных в результате измерений спутниковым прибором⁵. Проверка качества продукции должна выполняться разработчиками продукции после проведения калибровки прибора, и должна быть отражена в программах по проверке качества продукции, разработанных для каждого конкретного прибора. Руководящие указания для документирования качества продукции подготовлены в структуре обеспечения качества наблюдений за Землей (Fox, 2010).

Геофизическая продукция производится с использованием спутниковых данных (часто это измерения энергетической яркости) с применением алгоритма, основанного на физических или эмпирических факторах. Сравнение полученной продукции и трендов с полевыми наблюдениями или результатами моделирования является важной частью процесса для оценки и документирования надежности используемого алгоритма по извлечению данных и для определения области ее применения.

Если обнаружен определенный тренд, он может быть связан с работой конкретного прибора; прежде чем применять какие-либо эмпирические поправки необходимо выполнить тщательный анализ калибровки спутникового прибора и данных об окружающей среде.

Для многих видов продукции проверка качества продукции является сложной задачей, поскольку сравнение продукции, полученной на основе результатов спутниковых измерений, или продукции полученной на основе независимого контрольного прибора, часто с использованием измерений *in situ*, подвержено нескольким погрешностям: i) погрешности, присущей продукции на основе спутниковых данных; ii) погрешности в контрольных данных; iii) погрешности, обусловленной методологией проведения сравнения, часто из-за некорректной коллокации в пространстве и времени. В большинстве случаев разными методами измерения измеряются различные вещи: спутниковые наблюдения обычно покрывают относительно обширные районы (мгновенное поле зрения) и почти мгновенные измерения (несколько миллисекунд); наземные (*in situ*) измерения, как правило, очень локальны и результаты измерений обобщаются за относительно продолжительный период времени. Наземное дистанционное зондирование обычно обеспечивает получение информации об атмосферном столбе. Сравнение различных типов измерений требует применения методов масштабирования как в сторону увеличения, так и уменьшения масштаба, что может обуславливать введение погрешностей, зависящих от пространственных или временных факторов.

Модель оценки качества может использоваться для улучшения сравнений за счет понимания и объяснения этих различий и лучшего использования преимуществ и недостатков различных методов проверки качества данных. Обычно проведение проверки качества данных спутниковыми операторами сопровождается подготовкой такой оценочной модели.

Следует отметить, что для определенных видов спутниковой продукции может не существовать независимой проверки достоверности результатов измерений, и проверка качества спутниковых данных может проводиться только путем оценки воздействия продукции при ее применении (например при ассимиляции в модель ЧПП).

⁵ Определение предложено Рабочей группой КЕОС по калибровке и валидации.

6.2.2 Основные принципы проверки качества продукции

Проверка качества продукции на основе спутниковых данных должна выполняться в соответствии с передовыми методами работы и протоколами, зависящими от переменных величин, например разработанными Рабочей группой КЕОС по калибровке и валидации. Проверка качества полученных со спутников параметров и продукции может выполняться с использованием следующих источников:

- a) наземные измерения *in situ*;
- b) измерения методами наземного дистанционного зондирования;
- c) сравнение и усвоение моделей;
- d) другая полученная со спутников или смешанные виды продукции схожего типа.

Для использования таких источников проверки качества продукции необходимо, чтобы:

- a) были хорошо известны погрешности измерения;
- b) пространственно-временные выборки проводились по самым передовым протоколам;
- c) выборка была репрезентативной в отношении характерных условий окружающей среды, в зависимости от применения (например климатические зоны, морские режимы, атмосферные регионы, типы растительного покрова).

Например, в поддержку подготовки прошедшей проверку качества комбинированной спутниковой продукции на основе данных о температуре поверхности моря (ТПМ) Группа по данным высокого разрешения о ТПМ разработала комплексную стратегию проведения проверки качества данных⁶, которая включает в себя подробное описание протоколов, принципов для гармонизации концепции проверки качества достоверности данных различных спутниковых датчиков, с помощью которых проводится измерение температуры поверхности моря, потребности в измерениях *in situ* (буи) как источника данных наблюдений *in situ*, а также количественные показатели для контроля качества продукции.

6.2.3 Изучение воздействий

Опыт показывает, что результаты прямой проверки качества имеют меньшее значение для некоторой полученной со спутников продукции, чем для другой продукции. Поскольку критерии проверки качества спутниковой продукции объединяют в себе влияние различных источников погрешностей (спутниковая продукция, наземное измерение, метод сравнения), может быть затруднительно отделить от других ошибку, обусловленную самой спутниковой продукцией. Для определенных геофизических переменных наземные измерения могут быть довольно неточными. Для других переменных метод сравнения может слишком сильно зависеть от условий внешней среды, в которой проводятся наблюдения.

Таким образом, вариант оценки качества продукции для конкретного применения заключается в оценке воздействия на применение профессиональных навыков. В этом случае оценка отражает качество продукции наряду с возможностью ее применения и использования. Например, модели ЧПП показали незначительное воздействие для периода в двадцать лет по результатам атмосферного зондирования с целью измерения температуры-влажности воздуха; это воздействие изменилось на значительное положительное только тогда, когда применили непосредственное усвоение данных измерения излучения. Противоположным примером является усвоение данных о

⁶ <https://www.ghrsst.org/products-and-services/product-validation/>.

ветре и перемещении облачности, которые продемонстрировали сильное позитивное воздействие с первой попытки, хотя первоначальные результаты проведения проверки качества данных разочаровывали.

В заключение отметим, что проверка качества продукции требует полноценного анализа всех источников погрешностей и всех шагов по применению сравнительного метода. Если анализ показывает, что погрешность спутниковой продукции не может быть отделена от других погрешностей, выполнение исследования воздействия остается единственным механизмом проведения проверки качества продукции.
