

Качество радиометрических данных оптической аппаратуры наблюдения Земли и построение российской системы обеспечения единства радиометрических измерений этой аппаратурой

А.С. Панфилов¹, А.А. Бурдакин¹, В.Р. Гаврилов¹, В.С. Иванов¹, А.Н. Кондратенко²,
В.Н. Крутиков¹, Е.В. Маколкин², С.П. Морозова¹, Г.Г. Райкунов², Б.Б. Хлевной¹,
В.С. Чапоргин³, В.И. Саприцкий¹

¹ВНИИОФИ, 119361, Москва, ул. Озерная, 46, Тел.: (495) 781-8654, Факс (495) 781-8654,
E-mail: panfilov-m4@mail.ru,
²ЦНИИмаш, ³Роскосмос

Построение системы обеспечения единства радиометрических измерений оптической аппаратурой наблюдения Земли (АНЗ) – необходимое условие получения качественных данных. Она должна включать нормативно-методическую и техническую базы наземной калибровки и полетного контроля характеристик АНЗ. Представлены конкретные предложения по построению системы и первые шаги на пути ее реализации.

Ключевые слова: аппаратура наблюдения Земли, качество, единство измерений, данные, калибровка.

Введение

От качества данных российской аппаратуры наблюдения Земли (АНЗ) зависят:

- возможность эффективного решения с их помощью социально-экономических и научных задач;
- конкурентоспособность этих данных и производной продукции как на мировом, так и на внутреннем рынках космических услуг;
- уровень участия России в международных проектах.

Для получения качественных данных АНЗ и продукции на их основе необходима система обеспечения единства измерений с помощью АНЗ, базирующаяся на Государственной системе обеспечения единства измерений. Она должна включать нормативно-методическую и техническую базы систем наземной радиометрической калибровки и полетного контроля радиометрических характеристик АНЗ. Совместное использование положений обеспечения единства измерений, а также передового зарубежного опыта направлено на построение такой системы.

1. Радиометрические характеристики оптической АНЗ

Согласно (Earth, 2008) широко используется пассивная оптическая АНЗ различных типов:

- в большинстве случаев видеоинформационная аппаратура, обеспечивающая получение изображений наблюдаемых объектов;
- аппаратура зондирования атмосферы, которая, хотя и не строит изображений, но может давать информацию о пространственном распределении характеристик атмосферы.

К основным радиометрическим характеристикам АНЗ относятся:

1. спектральные характеристики чувствительности;
2. градуировочные характеристики (функции преобразования) и их линейность;
3. равномерность чувствительности по полю зрения;
4. характеристики шумовой составляющей сигнала на выходе и связанное с ней радиометрическое разрешение;
5. светорассеяние;

6. поляризационная чувствительность;
7. радиометрическая точность;
8. стабильность радиометрических характеристик.

Измерения радиометрических характеристик на завершающем этапе предполетных испытаний в процессе радиометрической калибровки АНЗ фиксируют результаты регулировки и настройки аппаратуры, включающие обеспечение преобразования заданного динамического диапазона входных сигналов и, как правило, линейности градуировочных характеристик; исключение неравномерности чувствительности по полю зрения, определение радиометрической точности. Контроль стабильности радиометрических характеристик должен проводиться как штатная операция на этапе летных испытаний и в процессе эксплуатации АНЗ.

С метрологической точки зрения АНЗ - это измерительный преобразователь, т.е. конструктивно обособленное техническое средство с нормативными метрологическими характеристиками, служащее для преобразования измеряемой величины на входе в измерительные сигналы, которые передаются, обрабатываются, хранятся, подвергаются дальнейшим преобразованиям и индикации. Измеряемые АНЗ величины определены ниже.

2. Качество данных и обеспечение единства измерений

ГОСТ 15467-79 определяет качество продукции как совокупность свойств, обуславливающих ее пригодность для удовлетворения определенных потребностей в соответствии со своим назначением. Количественно оно определяется показателем качества продукции – характеристикой одного или нескольких свойств продукции, входящих в ее качество, рассматриваемой применительно к определенным условиям ее создания и эксплуатации или потребления. Близкая трактовка дается в документе «Quality Assurance Framework for Earth Observation» QA4EO («Стратегия обеспечения качества данных наблюдения Земли»), разработанным в соответствии с 10-летним Планом создания Глобальной системы наблюдения Земли GEOSS (Панфилов и др., 2010). Его цель - формирование скоординированной стратегии действий по обеспечению качества и достижению функциональной совместимости данных различного типа, получаемых национальными системами, входящими в GEOSS.

Согласно QA4EO необходима метрологическая оценка получаемых данных для их надежной интеграции в различные системы и службы, обеспечивающие наблюдение Земли. Центральный принцип QA4EO - «все данные наблюдения Земли и производные продукты должны иметь ассоциированный с ними документированный и полностью прослеживаемый индикатор качества», позволяющий пользователю оценить возможность применения данных – их соответствие поставленной задаче. Для определения и поддержания на заданном уровне индикатора качества необходимо: создавать нормативную базу методов и процедур калибровки АНЗ и валидации производной продукции; выполнять их на всех этапах программы; сопоставлять предполетные и полетные характеристики АНЗ; проводить сличения АНЗ, свидетельствующие о разбросе и сдвиге данных из различных источников. Индикатор качества должен основываться на документированной количественной оценке неопределенности измерений, показывающей уровень прослеживаемости к международно признанным эталонам сравнения. Необходимо, чтобы процедура оценивания была полностью «прозрачна» и соответствовала Руководству ИСО по выражению неопределенности измерений (Evaluation, 2008; РМГ 43-2001, 2001). Согласно QA4EO, данные по калибровке и валидации (их описание и результаты) представляются на международном интернет портале по калибровке/валидации.

Подходы QA4EO перекликаются с положениями обеспечения единства измерений:

1. четкое определение измеряемых величин, данное с достаточной полнотой и принятое всеми исполнителями измерений;
2. выражение результатов измерений в узаконенных единицах;

3. прослеживаемость результатов измерений к первичному эталону;
4. точностные характеристики результатов измерений определены по единой методике и с заданной вероятностью не выходят за установленные пределы.

Выполнение этих положений обеспечивает единство измерений и на международном уровне, учитывая договоренности о взаимном признании национальных эталонов, калибровочных и измерительных сертификатов под эгидой Международного комитета мер и весов и проводимые сличения национальных эталонных средств измерений.

1. Измеряемые величины

Сигнал на выходе АНЗ зависит от спектральных, пространственных и энергетических характеристик объекта наблюдения и самой аппаратуры (Мирошников, 1977):

$$N = k \int \int \int \int L(x_1, y_1, \lambda) S(\lambda) h(x, y, x_1, y_1, \lambda) dx dy dx_1 dy_1 d\lambda, \quad (1)$$

где $L(x_1, y_1, \lambda)$ – спектральная плотность энергетической яркости (СПЭЯ) наблюдаемого объекта в точке с координатами x_1, y_1 на длине волны λ ,

$S(\lambda)$ – относительная спектральная характеристика чувствительности АНЗ,

$h(x, y, x_1, y_1, \lambda)$ - функция рассеяния оптической системы, создающей изображение наблюдаемого объекта,

k – коэффициент преобразования, в который входят максимальное значение спектральной характеристики (нормировка по максимуму $S(\lambda)$), а также независимые от λ параметры оптической системы и коэффициент усиления электронного тракта.

Для решения измерительной задачи нужно конкретизировать модель объекта измерения и определить измеряемую величину. При проведении радиометрических измерений, как правило, в качестве такого объекта принимается протяженная однородная по яркости и спектральным характеристикам ортотропная поверхность, не изменяющая свои характеристики во времени. Тогда можно не рассматривать частотно-контрастные и динамические характеристики, разделить пространственные и спектральные переменные при анализе измерений. При этом (1) можно переписать - для панхроматической и многозональной АНЗ

как $N = k \int L(\lambda) S(\lambda) d\lambda$ и измеряемой величиной является эффективная энергетическая

яркость (ЭЭЯ) $L = \int L(\lambda) S(\lambda) d\lambda$, т.е. яркость, приведенная к спектральной чувствительности

аппаратуры; для гиперспектральной АНЗ как $N_\lambda = k_\lambda L(\lambda)$ где в k_λ по сравнению с k входит еще ширина спектральной зоны, и измеряемой величиной является СПЭЯ $L(\lambda)$. В практике наблюдения Земли из космоса переходят от непосредственно измеряемой величины ЭЭЯ объекта к СПЭЯ. Переход осуществляется с использованием двух параметров, характеризующих спектральные свойства АНЗ: эквивалентной длины волны $\lambda_e = \int \lambda S(\lambda) L(\lambda) d\lambda /$

$\int S(\lambda) L(\lambda) d\lambda$ и эквивалентной ширины спектральной зоны $\Delta\lambda_e = \int S(\lambda) d\lambda$, следующим

образом $L(\lambda_e) = L / \Delta\lambda_e$. В спектральном диапазоне отраженного солнечного излучения (ОСИ) – (0,2 – 3) мкм переходят также к спектральной отражательной способности $\rho_\lambda = \pi d^2 / \cos z \cdot L(\lambda) / E(\lambda)$, где $E(\lambda)$ - спектральная солнечная постоянная, d - расстояние от Земли до Солнца, z – зенитное расстояние Солнца. В тепловом инфракрасном диапазоне (ТИК) - (3 – 25) мкм, где преобладает собственное излучение наблюдаемых объектов, можно перейти к эквивалентной T_e или яркостной T_B температуре, т.е. температуре черного тела T_{BB} , имеющего ту же ЭЭЯ или СПЭЯ, что и нечерное тело. Переход осуществляется по соотношению

$\int L(\lambda) S(\lambda) d\lambda = \int L(\lambda, T_B) S(\lambda) d\lambda$. Часто вместо T_e и T_B ошибочно говорят об измерении

радиационной температуры, но, согласно ГОСТ 7601-78, она измеряется неселективной аппаратурой. Все рассмотренные преобразования переводят прямые измерения в косвенные, что необходимо учитывать при оценивании точности измерений.

2. Единицы величин

Для обеспечения единства измерений их результаты должны выражаться в узаконенных единицах. Согласно ГОСТ 8.417-2002, это единицы Международной системы единиц СИ. Их использование также определено Резолюциями 21^{ой} Генеральной конференции по мерам и весам и Комитета по спутникам наблюдения Земли (СЕОС). Поэтому для рассмотренных величин принимаются следующие единицы величин: ЭЭЯ - [Вт/(м² ср)], СПЭЯ - [Вт/(м² ср км)], спектральная отражательная способность - безразмерная величина, эквивалентная или яркостная температура - [К].

3. Прослеживаемость результатов измерений к первичному эталону

Привязка к системе СИ подразумевает передачу размеров единиц с помощью Государственных поверочных схем (ГПС), опирающихся на первичные эталоны. В области оптической радиометрии - согласно ГОСТ 8.195 – 89. После утверждения в 2010 г. «Государственного первичного специального эталона единиц спектральной плотности энергетической яркости и относительного спектрального распределения мощности излучения в диапазоне длин волн от 0,3 до 25,0 мкм» (ГПСЭ) (Панфилов и др., 2011) разработан проект ГПС во главе с этим эталоном. Специфической особенностью ее является, в отличие от действующей схемы ГОСТ 8.195-89, возможность передачи размера единицы рабочим средствам измерений, минуя вторичные и рабочие эталоны, непосредственно от ГПСЭ с широкоапертурными эталонными излучателями.

4. Оценивание точности результатов измерений

В международной практике оценивание точности измерений осуществляется согласно Руководству (Evaluation, 2008) в терминах неопределенности измерений. Это соответствует положениям межгосударственных рекомендаций РМГ 43-2001 и требуется при аккредитации калибровочных лабораторий согласно действующему в России международному стандарту ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025-2006.

3. Опыт обеспечения качества данных в США

Работы США в данном направлении оформлены при создании системы EOS документом «EOS Level 1A Requirements Document 1989». Они ведутся также в рамках программ NOAA и др. и рассматриваются как процесс, в состав которого входят:

1. формирование радиометрических требований программы, включая требования по калибровке АНЗ;
2. наземные исследования компонентов и подсистем АНЗ с имитацией условий работы на орбите (температура, вакуум); использованием эталонов, прослеживаемых к первичным эталонам; формированием достоверной модели аппаратуры;
3. конечные испытания АНЗ:
 - **предполетные**, завершаемые наземной калибровкой АНЗ и получением прозрачного бюджета неопределенностей с возможностью его независимого критического анализа;
 - **полетные**, включая верификацию радиометрических характеристик АНЗ и их периодический контроль с использованием бортовых систем контроля, хорошо охарактеризованных наземных тестовых участков и наземных измерительных комплексов, вземных тестовых объектов, а также интеркалибровки.

В указанном документе EOS имеются следующие требования к калибровке и контролю радиометрических характеристик АНЗ:

- калибровка спутниковой аппаратуры проводится в единицах принятых физических величин;
- результаты калибровки, включая описание её процедуры, заносятся в выходную документацию аппаратуры;
- конструктивные особенности аппаратуры должны позволять проведение орбитального контроля, обеспечивающего сопоставимость его результатов с предполетными;
- анализ процедуры калибровки и радиометрических характеристик аппаратуры проводится независимой группой экспертов по метрологическому обеспечению.

Также признается оптимальным использование потенциала (специалистов, оборудования) национальных метрологических институтов на протяжении всей программы.

4. Показатели качества радиометрических данных и требования к ним

Для обеспечения качества данных необходимо определение показателей качества данных, требований к ним и анализ необходимого для их выполнения метрологического обеспечения. Согласно п.п. 1 и 2 к показателям качества радиометрических данных можно отнести следующие характеристики: радиометрическое разрешение, радиометрическую точность, стабильность радиометрических характеристик.

Шумовые характеристики АНЗ непосредственно влияют на точность радиометрических измерений. От амплитуды шумовой составляющей выходного сигнала зависит радиометрическое разрешение, определяемое как минимальное приращение входного сигнала, которое может быть зарегистрировано АНЗ при заданном уровне достоверности. В некоторых случаях радиометрическое разрешение характеризуется младшим разрядом шкалы квантования выходного сигнала. Для современной АНЗ характерны низкий уровень шумов и применение 10 и более разрядов при квантовании выходного аналогового сигнала, что обеспечивает высокое радиометрическое разрешение - $\leq 0,1$ %. Более проблемными являются: главный показатель - радиометрическая точность, и стабильность радиометрических характеристик. Результат радиометрического измерения с помощью АНЗ будет полным только при наличии оценки его точности, на которую оказывают влияние все рассмотренные радиометрические характеристики. Стабильность этих характеристик определяет возможность использования радиометрических данных на протяжении определенных интервалов времени.

В России проводились работы по формулированию требований к системам наблюдения Земли. Однако, как правило, в подготовленных документах требования к точности абсолютных радиометрических измерений и стабильности не выдвигались. Но такие требования существуют ввиду их высокой востребованности при решении задач мониторинга глобальных изменений климата, прогноза погоды и контроля состояния окружающей среды. Требования WMO, специалистов NOAA, NIST, NPOESS-IPO, NASA и других организаций обобщены в работе (Панфилов и др., 2010) - радиометрическая точность должна быть в пределах (0,5 – 5) % и (0,1 – 1) К, а стабильность – в пределах (0,1 – 1) % / десятилетие и (0,01 – 0,2) К / десятилетие в диапазонах ОСИ и ТИК соответственно. Эталонная база для калибровки АНЗ и контроля стабильности должна удовлетворять самым высоким требованиям, представленным в таблице.

Таблица. Максимальные требования к точности и стабильности

Спектральный диапазон	Требуемая радиометрическая точность	Требуемая радиометрическая стабильность (за десятилетие)
(0,3 – 3) мкм	0,5 %	0,1 %
(3 – 15) мкм	0,1 К	(0,01 – 0,04) К

При создании конкретных систем наблюдения Земли требования должны формироваться, исходя из требований потенциальных потребителей данных этих систем, и входить в ТТЗ на систему и ТЗ на используемую аппаратуру.

5. Сводка принципов обеспечения качества радиометрических данных

1. При постановке задачи проведения радиометрических измерений системой наблюдения Земли в ТТЗ на ее разработку и в ТЗ на входящую в ее состав АНЗ должны быть внесены показатели качества данных и требования к ним;
2. Необходимо четкое определение измеряемых величин, данное с достаточной полнотой и принятое всеми исполнителями измерений;
3. Посредством наземной радиометрической калибровки АНЗ и полётного контроля характеристик аппаратуры должна быть обеспечена прослеживаемость результатов измерений к системе национальных эталонов единиц измеряемых величин;
4. Результаты измерений должны выражаться в единицах Международной системы единиц СИ;
5. Необходимо представление точности радиометрических измерений в терминах неопределенности измерений и сведений по бюджету неопределенности измерений, который может быть подвергнут независимому критическому анализу;
6. Должен проводиться контроль радиометрических характеристик АНЗ в процессе ее работы на орбите с представлением неопределенности получаемых данных;
7. Необходимо внедрять передовые методы и процедуры наземной радиометрической калибровки АНЗ и контроля ее радиометрических характеристик в полете, стандартизованные и гармонизированные с международными;
8. Необходимо участие в проводимых международных сличениях АНЗ, предоставляющих свидетельства по совместимости данных;
9. На международном интернет портале по калибровке/валидации для каждого прибора должны быть представлены описание его калибровки и полученные результаты;
10. В рамках работ по созданию систем наблюдения Земли должна быть разработана программа обеспечения качества радиометрических данных на всех этапах – формулирования задач системы, создания аппаратуры, ее испытаниях и эксплуатации;
11. На всех этапах необходимо проведение экспертизы независимыми экспертами по метрологии и привлечение потенциала метрологических организаций.

6. Построение российской системы обеспечения единства радиометрических измерений оптической аппаратурой наблюдения Земли

Построение системы обеспечения единства измерений с помощью АНЗ должно основываться на Федеральном законе «Об обеспечении единства измерений» № 102 – ФЗ и Государственной системе обеспечения единства измерений ГОСТ Р 8.000-2000 и в качестве основных включать нормативно-методическую и техническую базы.

6.1 Нормативно-методическая база

В состав нормативно-методической базы должны войти действующие и подлежащие разработке документы. Относящиеся к рассматриваемой тематике действующие документы определяют:

1. Государственную систему обеспечения единства измерений ГОСТ Р 8.000-2000;
2. Унифицированные термины и определения - РМГ 29-99;
3. Применяемые в Российской Федерации единицы величин - ГОСТ 8.417-2002;
4. Передачу размеров единиц величин от эталонов к рабочим средствам измерений (АНЗ), регламентируемую Государственной поверочной схемой ГОСТ 8.195-89 и ГОСТ 8.061-80;
5. Рекомендации по применению «Руководства по выражению неопределенности измерений» - РМГ 43-2001;
6. Рекомендации по подготовке, оформлению и рассмотрению материалов испытаний средств измерений в целях утверждения типа - МИ 3290-2010;
7. Методики (методы) измерений - ГОСТ Р 8.563-2009;
8. Порядок аккредитации калибровочных лабораторий - ГОСТ Р ИСО/МЭК 17025-2000;
9. Метрологическую экспертизу технической документации - ГОСТ 8.384-80;
10. Порядок организации работ - Положение РК-98-КТ.

В число подлежащих разработке документов в первую очередь целесообразно включить:

- нормативный документ «Обеспечение качества радиометрических данных оптической аппаратуры наблюдения Земли», гармонизированный с QA4EO с целью выхода на международный уровень и в то же время имеющий практическую направленность;
- методику (и) наземной радиометрической калибровки оптической АНЗ;
- методику (и) полетного контроля радиометрических характеристик оптической АНЗ.

6.2 Техническая база

Данные по формированию российской технической базы радиометрической калибровки оптической АНЗ представлены в (Саприцкий и др., 2011) и (Крутиков В.Н. и др., 2011). Здесь остановимся на некоторых проблемных вопросах теплового ИК диапазона и их решении. В этом диапазоне в процессе калибровки должно быть исключено влияние атмосферных газов и для получения достоверных результатов необходима имитация реальной фоновой обстановки. В зарубежных установках это достигается размещением эталонных источников излучения и АНЗ в криовакуумной камере и калибровкой аппаратуры, включая измерение спектральной чувствительности, в рабочем диапазоне температур. В России единственный аналог (по данным открытой печати) – это установка ФГУП «Центр Келдыша». В ней есть ограничения по диаметру апертур калибруемой АНЗ и не измеряется спектральная чувствительность аппаратуры.

Создание низкотемпературной широкоапертурной модели черного тела в составе ГПСЭ - первый этап разработки эталонного радиометрического комплекса (ЭРК) для прецизионной калибровки спутниковой ИК аппаратуры с входными зрачками до 500 мм в низкофоновых условиях. Такая разработка начата ЦНИИмаш и ВНИИОФИ в 2011 г. ЭРК создается на базе высоковакуумного стенда «Квант-20» ЦНИИмаш и эталонного комплекса ВНИИОФИ. Впервые в отечественной практике будет реализована возможность измерений относительной спектральной чувствительности ИК спутниковой аппаратуры в условиях ее штатной эксплуатации. Уникальна также поставленная задача передачи размера единицы СПЭЯ в ТИК диапазоне от эталона на фазовом переходе вещества к протяженному излучателю. При этом устраняется необходимость решения сложной задачи определения СПЭЯ протяженного излучателя.

Относительно полетного контроля радиометрических характеристик АНЗ следует констатировать отсутствие системы такого контроля в России. При ее создании по результатам точностного и технико-экономического анализа должны быть выбраны методы и средства контроля, тестовые объекты, отвечающие поставленным требованиям.

Литература

1. *Мирошников М.М.* Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение. 1977.
2. Крутиков В.Н., Саприцкий В.И., В.С. Иванов и др. Построение российской системы обеспечения единства радиометрических измерений оптической аппаратурой наблюдения Земли // Тезисы доклада на II Всероссийской научно-технической конференции «Измерения и испытания в ракетно-космической промышленности». Москва. 2011.
3. *Панфилов А.С., Бурдакин А.А., Иванов В.С. и др.* Обеспечение радиометрической совместимости оптических данных наблюдения Земли в рамках Глобальной системы наблюдения Земли GEOSS // Исследование Земли из космоса, 2010. №5. С. 87 - 94.
4. *Панфилов А.С., Гаврилов В.Р., Иванов В.С. и др.* Новая эталонная база России для радиометрической калибровки оптической аппаратуры наблюдения Земли и оценка возможных уровней точности получаемых радиометрических данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2011. Т. 8. №2. С. 303 - 309.
5. РМГ 43-2001 Рекомендации по межгосударственной стандартизации. ГСИ. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений». 2001.
6. *Саприцкий В.И., Панфилов А.С., Морозова С.П. и др.* Метрологическое обеспечение радиометрических измерений оптической аппаратурой наблюдения Земли // Мир измерений, 2011. № 12. С. 14 – 20.
7. Earth Observation Handbook – Climate Change Special Edition. Committee on Earth Observation Satellites. ESA. 2008.
8. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. JCGM 100: 2008.

Earth Observation Optical Instruments' Radiometric Data Quality and Developing Russian Supporting System to Ensure Uniformity of Radiometric Measurements with these Instruments

A.S. Panfilov¹, A.A. Burdakin¹, V.R. Gavrillov¹, V.S. Ivanov¹, A.N. Kondratenko², V.N. Krutikov¹, E.V. Makolkin², S.P. Morozova¹, G.G. Raykunov², B.B. Khlevnoy¹, V.S. Chaporgin³, V.I. Sapritsky¹

¹ *VNIIOFI, 119361, Moscow, ul. Ozernaya, 46, Tel.: (495) 781-8654, Fax: (495) 781-8654, E-mail: panfilov-m4@mail.ru,*

² *TSNIImash,* ³ *Roscosmos*

Development of supporting system to assure traceability of radiometric measurements with Earth observation radiometric instruments (EORI) is obligatory for delivery of high quality data. Regulatory and procedural documentation together with apparatuses for pre-flight calibration and post-launch monitoring of the EORI characteristics constitute the said system. Hereafter some concrete proposals on establishment of supporting system and first actions in a way of its realization are reported.

Keywords: Earth observation instruments, quality, traceability, data, calibration.