



ПОСЛЕСТАРТОВАЯ И ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ КАЛИБРОВКА ОРБИТАЛЬНЫХ СЕНСОРОВ ОПТИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

POST-LAUNCH AND OPERATIONAL ENERGY CALIBRATION OF HIGH-RESOLUTION ORBITAL SENSORS OF OPTICAL RANGE

- Л.М. Атрошенко**, кандидат физико-математических наук, директор подспутникового полигона “Скрипалі” ООО “Лес-Информ”, г. Харьков
- Г.А. Борщева**, начальник группы ГП “Конструкторское бюро “Южное” им. М.К. Янгеля”, г. Днепр
- Н.Н. Горобец**, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина
- О.В. Луць**, инженер-программист 1-й категории ГП “Конструкторское бюро “Южное” им. М.К. Янгеля”, г. Днепр
- Е.Д. Ярмольчук**, начальник проектного отдела ГП “Конструкторское бюро “Южное” им. М.К. Янгеля”, г. Днепр



Л.М. Атрошенко



Г.А. Борщева



Н.Н. Горобец



О.В. Луць



Е.Д. Ярмольчук

Предложен подход к вопросам радиометрической калибровки оптических сенсоров орбитального базирования, основанный на данных наземных измерений плотности потока радиации падающего и отраженного солнечного излучения с использованием искусственно созданных тест-объектов.

Ключевые слова: космический аппарат, оптическая полезная нагрузка, калибровка, тест-объект.

The approach to radiometric calibration of optical sensors of orbital basing based on the data of ground measurements of the power density of incident and reflected solar radiation using artificially created test objects is proposed.

Keywords: spacecraft, optical payload, calibration, test object.

Введение

Важнейшим условием эффективной работы космических аппаратов дистанционного зондирования

Земли (КА ДЗЗ) является внешняя калибровка сенсоров — как послестартовая, так и эксплуатационная.

Для КА ДЗЗ оптического диапазона одной из основных составляющих послестартовой калибровки является абсолютная энергетическая калибровка. Под этим термином понимается определение в каждом спектральном канале зависимости (калибровочного коэффициента K_0) между значениями кодов выходных сигналов оптической полезной нагрузки (ОПН) космического аппарата и значениями ее входных величин — характеристик приходящего на сенсор КА излучения.

В процессе послестартовой калибровки оценивается соответствие значений, неопределенностей и уровней достоверности наземной (предполетной) калибровки K_{00} и тех же характеристик внешней калибровки сенсора $K_0 = K_{00} + \Delta K$. Оценка ΔK не является самоцелью, она призвана установить, не повлияли ли процесс вывода КА на орбиту на характеристики сенсора. В контексте ДЗЗ гораздо более важным представляется оценка самого коэффициента K_0 . Если $\Delta K \neq 0$ в силу изменения характеристик ОПН при выводе КА на орбиту или неточности расчетов согласно

принятой модели, то по итогам послестартовой калибровки вводится поправочный коэффициент. При этом важно принять к рассмотрению такую модель, которая бы учитывала все факторы атмосферной коррекции (вне зависимости от их природы) и была в общем виде справедлива в любых условиях распространения солнечной энергии.

Помимо прямого назначения, результаты дополнительных расчетов по данным послестартовой калибровки (установление генерального среднего калибровочного коэффициента — K_{ex}) могут служить основанием для проведения эксплуатационной (текущей, согласно регламенту эксплуатации, и оперативной, обеспечивающей подтверждение данных аттестации непосредственно заказчику) калибровки по материалам контрольных измерений.

Текущая калибровка призвана оценивать уровень деградации ОПН КА с течением времени (или под воздействием экстраординарных явлений в ближнем космосе — тогда калибровочный коэффициент изменяется скачком) и проводится регулярно согласно регламенту работ.

Оперативная калибровка выполняется по желанию заказчика путем проведения двух сеансов калибровки — в ближайшее возможное время до и после проведения съемки указанного потребителем участка земной поверхности. При наличии результатов оперативной калибровки результаты съемки выдаются потребителю с сертификатом.

Задачей настоящей работы и является разработка методики оценки в каждом спектральном канале калибровочного коэффициента ОПН КА.

По мере накопления результаты внешней калибровки могут использоваться для установления методами криволинейного многофакторного регрессионного анализа зависимости между значениями калибровочных коэффициентов и наблюдаемыми в момент съемки параметрами окружающей среды, такими как атмосферное давление, прозрачность атмосферы и т. п.

1. Наземное обеспечение послестартовой и эксплуатационной калибровки

Наземное сопровождение процесса калибровки определенного канала обеспечивается наземным испытательным средством — аттестованным тестовым объектом (ТО), обладающим спектром отражения преимущественно в данном канале. Он состоит из основной горизонтальной площадки (ОП), обладающей диффузным рассеянием и размером не менее 3×3 проекции пикселя на земную поверхность. Такой размер ОП обеспечивает попадание на поверхность ТО хотя бы одной проекции пикселя при любом положении пикселей в растре.

Пиранометр помещается вблизи центра тестового объекта с размерами порядка десятков метров на небольшой высоте (например, 1 или 2 м), а ось пиранометра располагается перпендикулярно к плоскости ТО, то есть в надир. В таком случае практически все поле зрения пиранометра (полусфера) направлено на тестовый объект и в него не будет попадать “боковой подсвет”. При этом возможная погрешность ERR, возникающая за счет неодинакового коэффициента отражения ТО и окружающей подстилающей поверхности, не превысит

$$ERR = \frac{1,2}{15} \cdot \frac{\rho_{под}}{\rho_{ТО}} \cdot 100 \%$$

Даже при отношении

$$\frac{\rho_{под}}{\rho_{ТО}} = 0,5$$

возникающая за счет отсутствия учета бокового подсвета погрешность не превысит 4 % (см. рис. 1).

Для каждого канала для синхронных с орбитальными измерений уровня солнечного излучения, приходящего на тест-объект и отраженного от ТО, используются два идентичных прибора (например, высокоточные пиранометры), снабженных фильтра-

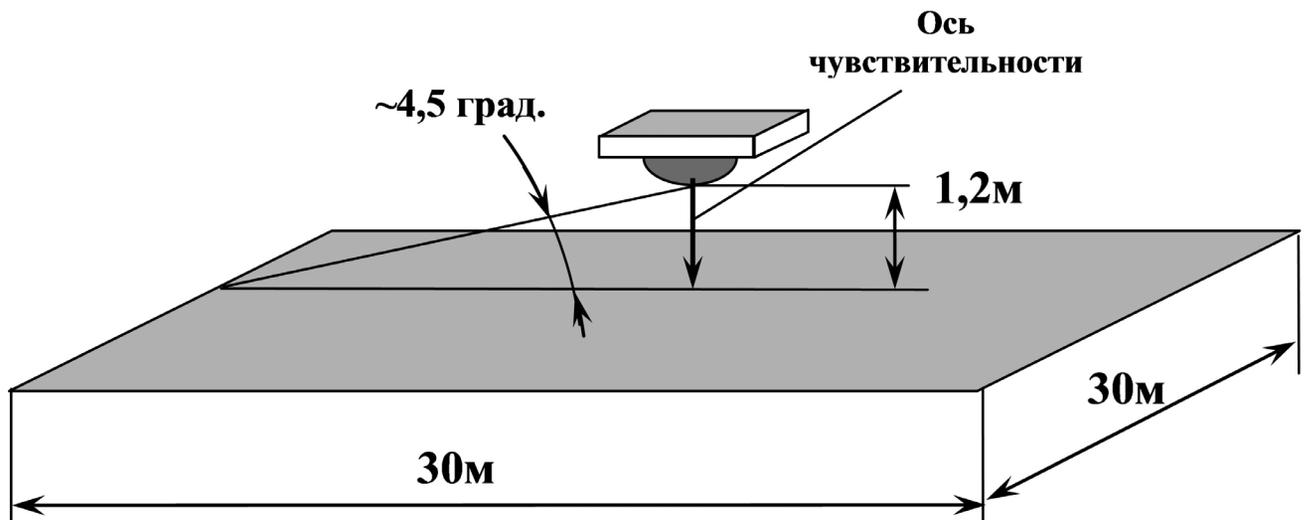


Рис. 1. Расположение измерительного прибора на тест-объекте

ми, соответствующими по диапазону длинам волн калибруемого канала, и поворотными устройствами. Измерительные приборы должны быть расположены на одной высоте (для наблюдателя удобнее всего высота 1,2 м) и снабжены устройствами, фиксирующими азимутальное и угловое положение их датчиков.

Для получения данных, не входящих в расчеты K_0 , но необходимых для наземного обеспечения калибровочного процесса, используются: приемник геопозиционирования (GPS), буссоль, угломер, уровень и т. п.

Методическое и программное обеспечение (ПО) калибровки включает:

- методики измерений падающего на ТО и отраженного от него излучения;
- методику аттестации тест-объекта;
- методики и ПО расчета калибровочных коэффициентов и их неопределенностей;
- методику и ПО формирования итогового файла по сеансу калибровки.

Все методики должны иметь сертификаты соответствия.

Программное обеспечение входит в состав автоматизированного рабочего места, предназначенного для проведения расчетов и формирования итогового файла по сеансу калибровки.

2. Расчет углов наземных наблюдений приходящего на объект и уходящего от объекта солнечного излучения

В оптике атмосферы, как и в ДЗЗ, для характеристики положения Солнца используются его высоты над горизонтом [1]. Кроме того, часто отсчитывают углы от оси “зенит–надир”. Угол, отсчитываемый от зенита, называется зенитным углом, угол, отсчитываемый от местного горизонта — углом места. Для проведения наземных измерений плотности мощности падающей (со стороны Солнца) и отраженной (в сторону КА) энергии необходимо рассчитать углы наблюдений (см. рис. 2).

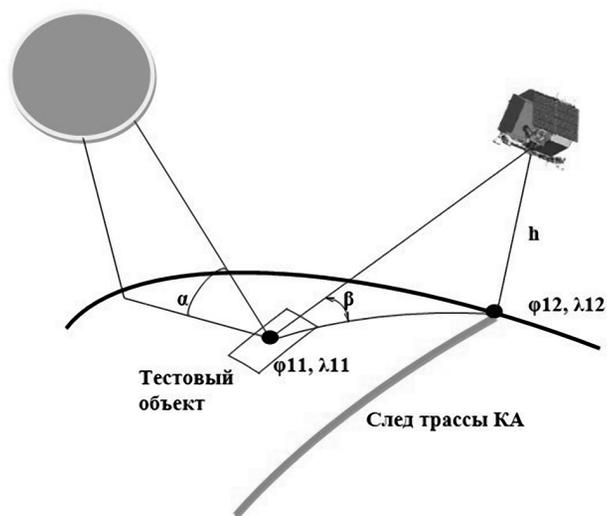


Рис. 2. Расположение углов места Солнца и места КА: h — высота орбиты КА; α — угол места Солнца; β — угол места КА

Угол места Солнца (α) приводится в файле аннотационной информации.

Угол места КА (β) рассчитывается следующим образом.

Эксцентриситет земного эллипсоида, безразмерная величина:

$$e = \sqrt{f - (2 - f)}, \quad (1)$$

где f — коэффициент, учитывающий полярное сжатие Земли, $f=1/298,257223563$ (WGS-84).

Средняя географическая широта между координатами тестового участка и КА, рад:

$$\varphi_s = \frac{\varphi_{11} + \varphi_{12}}{2},$$

где φ_{11} — географическая широта тестового участка, рад; φ_{12} — географическая широта КА, рад (приводится в файле аннотационной информации к снимку).

Радиус эллипсоида Земли на средней широте между координатами тестового участка и КА, м:

$$R_1 = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot (\sin(\varphi_s))^2}}.$$

Расстояние между координатами тестового участка и подспутниковой точкой КА по ортодромии, м:

$$L = R_1 \cdot \arctg\left(\frac{\sqrt{u^2 + (g)^2}}{x}\right),$$

где λ_{11} — географическая долгота тестового участка, рад; λ_{12} — географическая долгота КА, рад;

$$x = \sin(\varphi_{11}) \cdot \sin(\varphi_{12}) + \cos(\varphi_{11}) \cdot \cos(\varphi_{12}) \cdot \cos(\lambda_{12} - \lambda_{11});$$

$$u = \cos(\varphi_{12}) \cdot \sin(\lambda_{12} - \lambda_{11});$$

$$g = \cos(\varphi_{11}) \cdot \sin(\varphi_{12}) - \sin(\varphi_{11}) \cdot \cos(\varphi_{12}) \cdot \cos(\lambda_{12} - \lambda_{11}).$$

Угол места КА, рад:

$$\beta = \arctg\left(\frac{(h + R_1) \cdot \cos\left(\frac{L}{R_1}\right) - R_1}{(h + R_1) \cdot \sin\left(\frac{L}{R_1}\right)}\right).$$

3. Расчет плотности потока радиации отраженного излучения, приходящего на верхнюю границу атмосферы и ОПН КА

Задачи послестартовой и эксплуатационной калибровки требуют оценить уровни энергии, отраженной наземным объектом и пришедшей от него на верхнюю границу атмосферы. Такая оценка осложнена тем, что на ОПН КА приходит три части отраженного излучения: отражение от исследуемого объекта, отражение от атмосферы (см. рис. 3) и так называемый “боковой подсвет”. В узком понима-

нии боковой подсвет (В) обеспечивается частью солнечного излучения, отраженного от неоднородностей подстилающей поверхности соседних с тестовым участком (строений, травянистого и древесного покровов и т. д.).

В целях минимизации уровня бокового подсвета тест-объект располагают вдали от антропогенных объектов и на расстоянии $L > H \operatorname{tg} \varphi$ от древесной растительности (здесь H — максимальная высота древостоя, $\varphi = \arcsin [\min (\alpha, \beta)]$). Трава на всем пространстве мишенного комплекса (территории, включающей комплекс тест-объектов) выкашивается. В зимнее время на поверхности мишенного комплекса на время проведения сеанса (серии сеансов) калибровки снег убирается либо (во избежание излишних трудозатрат) выравнивается и уплотняется.

Проблемам абсолютной калибровки посвящено множество работ, применяющих различные модели атмосферы, расчеты переноса излучения в системе атмосфера — подстилающая поверхность, многоуровневые эксперименты (земля, вертолет, самолет, КА), использование двух и более тестовых участков [2], различные сложные методы расчета и т. д. В результате неопределенность различных методов абсолютной калибровки оценивается в диапазоне от 6 до 200 % [3]. При этом в таких оценках, как правило, не учитывается погрешность множества сопутствующих наземных измерений (таких как параметры атмосферы, коэффициенты яркости и альbedo подстилающей поверхности и т. д.), результаты которых являются исходными данными расчетов.

Более продуктивным подходом, на наш взгляд, следует считать проведение минимального количества измерений оптических характеристик на земле

и рассмотрение в качестве передаточной функции соотношения, полученного из общефизических соображений и обеспечивающего стабильность погрешности расчетов.

Поскольку отношение квадратов расстояний от Солнца до границы атмосферы и от Солнца до поверхности Земли отличается от единицы лишь в шестом знаке после запятой, распространение света в атмосфере будем рассматривать как распространение плоской волны. Результат ослабления света атмосферой в первом приближении описывается законом Бугера — Ламберта — Бера [4]:

$$W_p = W_{sc} \exp(-\tau l), \quad (2)$$

где W_p — плотность мощности излучения в определенном диапазоне длин волн, приходящая на поверхность Земли, Вт/м²; W_{sc} — плотность мощности излучения в определенном диапазоне длин волн, приходящая на границу атмосферы (около 10 км), Вт/м²; τ — коэффициент поглощения излучения в атмосфере, пропорциональный ее оптической толщине; l — коэффициент, учитывающий увеличение пути прохождения лучей в атмосфере (увеличение преодолеваемой массы атмосферы), который рассчитывается по формуле $l = l_0 / \cos(\omega)$; $l \in [0, l_0 / \cos(\omega)]$, где l_0 — расстояние до границы атмосферы по нормали к поверхности Земли в точке съемки; ω — угол наблюдения между зенитом и направлением на небесный объект.

В соответствии с рис. 1, для наблюдения Солнца угол ω равен

$$\frac{\pi}{2} - \alpha, \text{ для наблюдения КА } \frac{\pi}{2} - \beta.$$

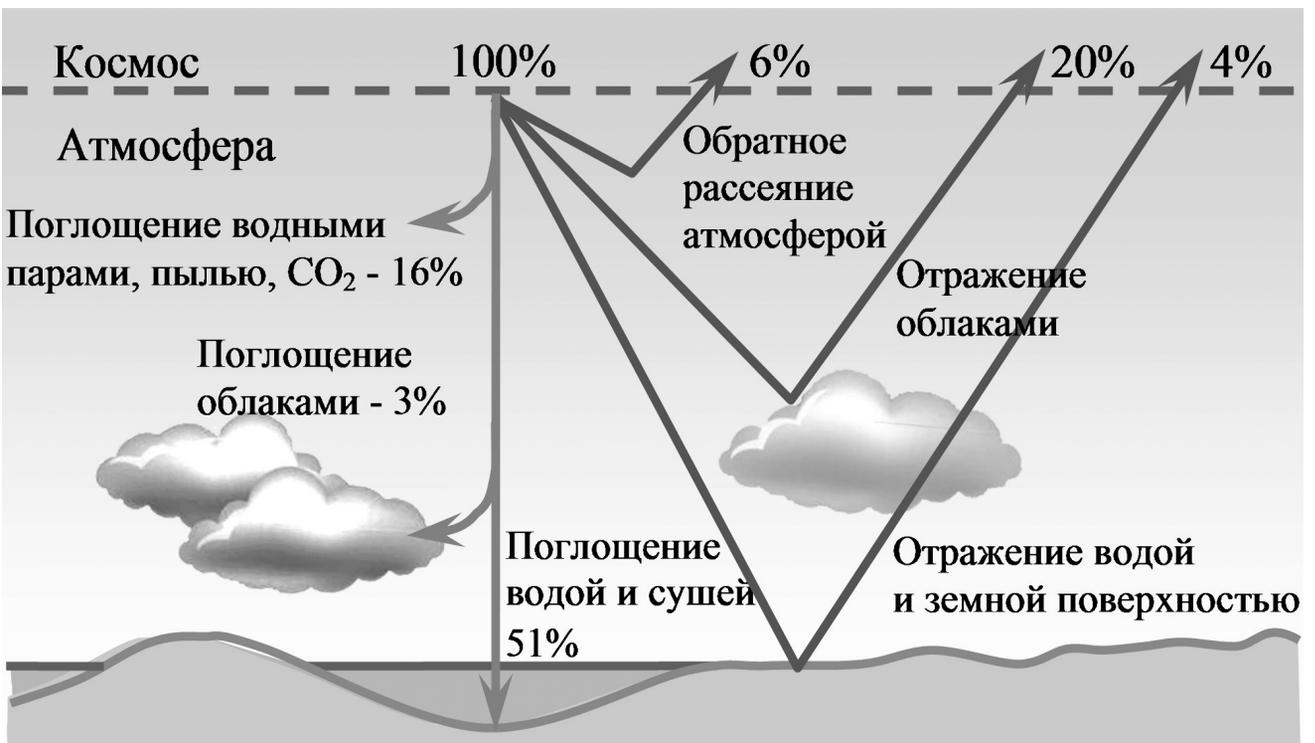


Рис. 3. Распределение солнечной энергии на границе атмосферы

Отраженная от бесконечно большой плоскости ($d \gg \lambda$) электромагнитная волна имеет в качестве поверхности равных фаз плоскость [5], то есть также является плоской.

В реальности ослабление мощности света атмосферой действительно происходит по экспоненциальному закону (что экспериментально определено Бугером еще в 1729 г.). Атмосфера представляет собой мутную среду, в которой редуцированный [6] показатель экспоненты τ отражает влияние на прохождение света всех присутствующих факторов – рассеяния и преломления всех видов. В то же время, плотность атмосферы, от которой зависит “концентрация” всех имеющихся в атмосфере влияний на распространение светового потока, возрастает на пути от ее границы до поверхности Земли также по экспоненциальному закону [7].

Следует учитывать, что часть ξ падающей на границу атмосферы солнечной энергии отражается самой атмосферой и не достигает поверхности Земли. Тогда вместо части W_{sc} солнечной постоянной S_0 , соответствующей определенному каналу, в качестве множителя в соотношении (1) следует записать $(1 - \xi)W_{sc} = W_0$.

Здесь нужно отметить очень важную в данном контексте особенность величин W_{sc} и ξ . Хотя солнечная постоянная S_0 и не является истинно постоянной величиной, ее колебания составляют не более десятых долей процента. Так, например, измерения спутниковых приборов в течение 1978–1997 гг. показали, что в этот период вариации S_0 составляли 1,5 Вт/м², в то время как международной комиссией в качестве стандартного значения солнечной постоянной (по Международной пиргелиометрической шкале 1956 г.) рекомендовано принять величину 1370 Вт/м² [8]. Вековые изменения S_0 по оценкам [9] могут достигать 10 Вт/м². Колебания же уровня отраженной атмосферой световой энергии по последним оценкам [10] не превышают 1 % от абсолютного значения, составляющего 6 % от S_0 .

Введем следующие обозначения: A – плотность мощности падающего излучения, измеренная на ТО в направлении Солнца, Вт/м²; C – плотность мощности уходящего в направлении КА сигнала, Вт/м².

В соответствии с законом Бугера (2), получим следующее: на датчик, измеряющий падающую на поверхность тестового объекта мощность светового излучения, со стороны Солнца приходит

$$A = (1 - \xi) \cdot W_{sc} \exp \left(-\tau \cdot \frac{l_0}{\cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)} \right). \quad (3)$$

Из (3) выразим τ :

$$\tau = - \frac{\ln\left(\frac{A}{W_{sc} \cdot (1 - \xi)}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)}{l_0}.$$

Очевидно, что характеристики атмосферы на пути прохождения лучей от Солнца к ТО и от ТО к КА одинаковы, соответственно коэффициент τ будет тем же.

Выражение для расчета плотности потока радиации, приходящей от ТО к границе атмосферы в направлении на КА, можно записать следующим образом:

$$C_1 = C \cdot \exp\left(\frac{\ln\left(\frac{A}{W_{sc} \cdot (1 - \xi)}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right)}{l_0} \cdot \frac{l_0}{\cos\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right)}\right),$$

где значение l_0 – толщина атмосферы (расстояние по нормали от границы атмосферы до поверхности геоида, выраженное в метрах) на широте тест-объекта, берется из [11].

Плотность потока радиации солнечной энергии на верхней границе атмосферы можно определить как сумму плотности мощности, приходящей от ТО и части солнечной энергии ξ , отраженной самой атмосферой:

$$C_2 = C_1 + W_{sc} \cdot \xi.$$

Плотность мощности солнечной энергии на входной апертуре сенсора КА C_3 может быть определена с учетом расстояния от границы атмосферы до КА:

$$C_3 = C_2 \cdot \frac{S_p}{h^2},$$

где S_p – проекция площади пикселя на границе атмосферы.

Тогда искомым калибровочный коэффициент представляет собой отношения плотности мощности на входной апертуре сенсора КА к выходному коду (КОД) чувствительного элемента:

$$K_0 = C_3 / \text{КОД}.$$

Систематической ошибкой приведенного здесь рассмотрения может служить только возможная неточность оценки величины ξ , составляющая, как сказано выше, 0,06 % от значения части солнечной постоянной, соответствующей каждому каналу. Случайные же ошибки определяются погрешностями используемых приборов. Погрешности измерения современных пиранометров (например, пиранометров Кеер&Зонен) не превышают 0,5 %. Таким образом, неопределенность оценки K_0 не превышает 1 %.

Выводы

Получены зависимости, позволяющие рассчитать плотность мощности, приходящую на входной зрачок сенсора КА на основании следующих исходных данных:

- измеренного значения плотности мощности излучения, падающего на ТО от Солнца;

- измеренного значения плотности мощности отраженного излучения в направлении КА;
- угла места Солнца;
- угла места КА.

Как и все методики калибровки ОПН КА, предлагаемый подход предназначен для проведения работ только при безоблачной атмосфере и отсутствии дымки (не менее 7 баллов видимости).

Предложенный подход разрешает, на наш взгляд, ряд проблем, возникающих при решении задачи калибровки сенсоров космического базирования:

1) преимущество использования в процессе энергетической калибровки ОПН КА специально созданных искусственных тест-объектов, заключающееся, в первую очередь, в постоянстве их характеристик, значительно повышает надежность калибровки и сопоставимость ее результатов, открывает тем самым возможности для сертификации выходной продукции КА ДЗЗ;

2) сведение необходимых для наземного обеспечения калибровочного процесса типов измерений к определению только одного оптического параметра, аналогичного наблюдаемому с орбиты (без привлечения данных о текущих характеристиках атмосферы), существенно уменьшает неопределенность оценки калибровочных коэффициентов и делает возможными ее минимизацию и точный расчет.

Список литературы

1. Тимофеев Ю. М., Васильев А. В. Основы теоретической атмосферной оптики. Санкт-Петербург, 2007. 152 с.
2. Способ определения калибровочного коэффициента для калибровки оптического спутни-

кового сенсора высокого пространственного разрешения в абсолютных энергетических единицах: пат. ВУ15950 С1 2012.06.30.

3. Беляев Б. И., Катковский Л. И. Оптическое дистанционное зондирование. Минск: БГУ, 2006. 455 с.
4. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Москва, 2005. Т. IV. Оптика. 683 с.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Электродинамика сплошных сред. Москва: Наука. Гл. ред. физ. — мат. лит-ры, 1982. 618 с.
6. ГОСТ 7601–78. Физическая оптика. Термины, буквенные обозначения и определения основных величин.
7. Матвеев Л. Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. Ленинград: Гидрометеиздат, 1984. 752 с.
8. Frohlich C., Lean J. The Sun's total irradiance: Cycles, trends and related climate change uncertainties since 1976. *Geophys. Res. Lett.* 1998. Vol. 25. № 23, pp. 4377–4380.
9. Скляр Ю. А. Солнечная постоянная (состояние исследований) // Исследование Земли из космоса. 1994. № 4. С. 96–110.
10. Шатунова М. В., Рублев А. Н., Дмитриева-Араго Л. Р. Метод расчета потоков солнечного излучения в системе Земля — атмосфера. Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. Вып. Физика атмосферы и прогноз погоды / под ред. Л. Р. Дмитриевой-Араго. 2010. № 344. С. 21–36.
11. ГОСТ 24631–81. Атмосферы справочные. Параметры.

Статья рекомендована к публикации доктором физико-математических наук, профессором Н. Г. Кодином