

УДК 528.8+90.03

АЛГОРИТМ ПОСЛЕСТАРТОВОЙ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ ОПТИЧЕСКОЙ ПОЛЕЗНОЙ НАГРУЗКИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Л.М. Атрошенко³, Г.А. Борщева¹, Н.Н. Горобец², А.Л. Костриков⁴,
О.В. Луць¹, Е.Д. Ярмольчук¹

¹Государственное предприятие "Конструкторское бюро "Южное" им.М.К.Янгеля", Криворожская,3, Днепр,
E-mail: aparel@meta.ua

²Харьковский Национальный университет имени В.Н.Каразина, Свободы,4, Харьков
E-mail: nikolay.n.gorobets@karazin.ua

³Научно – производственное предприятие «ЛЕС - ИНФОРМ», Серповая,11, Харьков
E-mail: imatroshenko@gmail.com

⁴Национальный научный центр «Институт метрологии»
E-mail: alex_kost@ukr.net

Поступила в редакцию 21 мая 2018 г.

Разработан универсальный алгоритм, позволяющий провести послестартовую радиометрическую калибровку оптической полезной нагрузки космического аппарата с использованием измерений энергетической яркости излучения Солнца, падающего на тестовый объект и отраженного от него. Исключена необходимость учета параметров атмосферы и бокового подсвета, что позволяет оценивать изменение характеристик оптического сенсора космического аппарата при эксплуатации и формировать выходную продукцию высокого качества для продуктивного решения тематических задач.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ДЗЗ, калибровка, космический аппарат, радиометрическая калибровка, алгоритм.

Розроблено універсальний алгоритм, що дозволяє провести післястартове радіометричне калібрування оптичного корисного навантаження космічного апарату з використанням вимірювань енергетичної яскравості випромінювання Сонця, що падає на тестовий об'єкт і відбитого від нього. Виключена необхідність врахування параметрів атмосфери і бічного підсвічування, що дозволяє оцінювати зміну характеристик оптичного сенсора космічного апарату при експлуатації і формувати вихідну продукцію високої якості для продуктивного рішення тематичних завдань.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: Дистанційне зондування Землі, калібрування, космічний апарат, радіометричне калібрування, алгоритм.

The universal algorithm has been developed that allows for post-start radiometric calibration of the optical payload of a spacecraft using measurements of the energy brightness of the solar radiation incident on the test object and reflected from it. The necessity to take into account the parameters of the atmosphere and the side illumination is excluded, which makes it possible to evaluate the change in the characteristics of the optical sensor of a spacecraft during operation and to form output products of high quality for a productive solution of thematic problems.

KEY WORDS: Earth remote sensing, calibration, spacecraft, radiometric calibration, algorithm

ВВЕДЕНИЕ

Конечной целью космической многоспектральной съемки поверхности Земли является получение значений коэффициентов отражения (альbedo) наземных объектов в определенных спектральных диапазонах электромагнитного излучения. Практически значимое решение тематических задач потребителей невозможно без знания истинных значений альbedo. Получение их достигается абсолютной радиометрической калибровкой оптической полезной нагрузки (ОПН) космических аппаратов (КА), разработке методов которой в силу большой научной, практической и экономической востребованности посвящена обширная литература.

Значения альbedo могут быть получены путем использования следующих величин:

1. Соотношения выходных сигналов (кодов пикселей) бортовой ОПН КА и спектральной яркости объектов, приходящей на входную апертуру ОПН, полученного в результате наземных испытаний при изготовлении или предстартовой подготовке КА (предстартовой калибровочной характеристики).

2. Физических параметров условий проведения съемки (освещенности и параметров среды распространения излучения).

3. Калибровочной характеристики, полученной в результате проведения послестартовой калибровки ОПН КА.

На практике первый путь оказывается недостаточно эффективным вследствие того, что при транспортировке и запуске КАОПН подвергается воздействиям, влияние которых сложно учесть. В течение же срока эксплуатации КА, как правило, характеристики ОПН претерпевают временной дрейф, т.е. могут существенно изменяться.

Второй путь решения проблемы, подходы к которому искало множество исследователей, сопряжен с построением и последующим использованием разнообразных моделей атмосферы, что лишает полученные результаты универсальности применения.

С учетом изложенного, поставленную задачу наиболее рационально решать путем получения калибровочных характеристик ОПН в результате послестартовых измерений. Калибровочная характеристика - это соотношение (функциональная зависимость) кодов пикселей на выходе ОПН КА от энергетической яркости (плотности мощности) излучения на входной апертуре ОПН. При летных испытаниях и в течение срока эксплуатации КА должно проводиться измерение достигнутых значений калибровочной характеристики путем проведения послестартовой квалификационной и эксплуатационной радиометрической (т.н. «внешней») калибровки.

Принципиальным отличием внешней калибровки от наземной, предстартовой, является удаленность объекта калибровки от исследователя и вариантность условий ее проведения. Поэтому для проведения ее необходимо провести съемку тестовых наземных объектов с различными значениями альбедо, измерить интенсивность падающего и отраженного излучения при съемке, рассчитать энергетическую яркость на входной апертуре ОПН и сопоставить результаты расчетов со значениями кодов яркости на выходе ОПН КА. Ключевым вопросом в данном контексте является необходимость разработки и использования непротиворечивого и универсального алгоритма расчета энергетической яркости излучения, приходящей к входной апертуре ОПН. Разработке такого алгоритма и посвящена настоящая работа.

ОТПРАВНЫЕ ДАННЫЕ

Постановка задачи. Разработать математическую модель (алгоритм) расчета части энергетической яркости излучения тестового объекта, приходящей к входной апертуре ОПН КА, с целью получения фактического значения текущей калибровочной характеристики ОПН.

Исходные положения и допущения:

- источником излучения является Солнце;
- для измерения энергетической яркости излучения, приходящего от Солнца к тестовому объекту и отраженного от него, используются приборы, измеряющие энергетическую яркость излучения в диапазоне, соответствующем спектральному диапазону соответствующего канала ОПН; при этом при измерении приходящего излучения прибор помещают осью чувствительности в направлении Солнца;
- размеры тестового объекта и высота установки измерительных приборов над ним выбираются из условия исключения влияния бокового подсвета на измеренную величину энергетической яркости отраженного излучения.

Для выполнения этого условия для измерения энергетической яркости, отраженной от тестового объекта, прибор помещают вблизи центра ТО на подвесе. Ось пиранометра располагается перпендикулярно к плоскости тестового объекта, т.е. в направлении надира. Высота подвеса должна обеспечивать максимальную степень перекрытия тестовым объектом поля зрения пиранометра. В частности, для проведения калибровки сканера МСУ, входящего в состав отечественного космического аппарата "Сич-2-1" (с проекцией шага чувствительного элемента на поверхность Земли ~7,8 м при съемке ТО в надир), обеспечивается расположение прибора над тестовым объектом площадью 30м × 30м при измерении энергетической яркости, отраженной от ТО, не выше 1,2м (см. рис. 1).

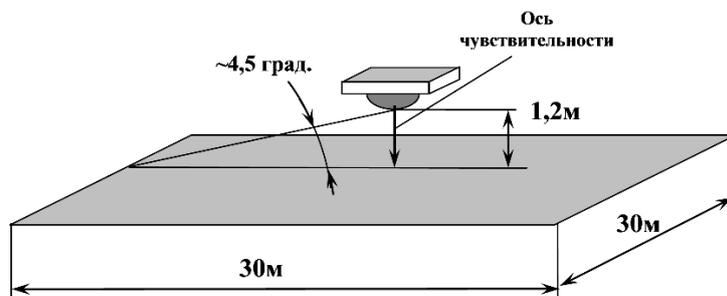


Рис.1. Пример положения пиранометра над тестовым объектом

- распространение света в атмосфере подчиняется закону Бугера – Ламберта – Бера;
 - эффективные характеристики поглощения излучения атмосферой на пути прохождения лучей от Солнца к тестовому объекту и от тестового объекта к КА идентичны [1].

Используемые константы:

E_0 - солнечная постоянная (энергетическая яркость излучения Солнца на расстоянии одной астрономической единицы) [2];

a - длина большой полуоси Земли;

b - коэффициент, учитывающий полярное сжатие Земли.

Исходные данные:

DD - дата съемки;

h - высота орбиты;

α - угол места Солнца;

A - энергетическая яркость излучения, пришедшего от Солнца к тестовому объекту, в калибруемом диапазоне длин волн;

C - энергетическая яркость излучения, отраженного тестовым объектом в калибруемом диапазоне длин волн;

ϕ_1, γ_1 - координаты (широта и долгота) тестового объекта;

ϕ_2, γ_2 - координаты (широта и долгота) КА при съемке тестового объекта;

$\lambda_{\min}, \lambda_{\max}$ - значения границ длин волн калибруемого спектрального диапазона;

D - эффективный диаметр входной апертуры;

f_f - фокусное расстояние объектива ОПН;

n - количество чувствительных элементов фотоприемной структуры;

$\kappa_{\text{об}}$ - коэффициент прозрачности объектива ОПН;

Δx - размер чувствительного элемента вдоль фотоприемной структуры;

Δy - размер чувствительного элемента поперек фотоприемной структуры;

S_f - площадь фокальной плоскости;

S_{ap} - площадь входной апертуры;

δ - множитель для определения расстояния от Солнца до тестового объекта во время съемки (определяется в зависимости от координат снимаемых объектов и даты съемки DD на сайте НАСА для Космической программы "HORIZONS"[3];

$W(\lambda)$ - функция распределения энергетической яркости Солнца, приходящейся на диапазон длин волн от 0 до λ в оптическом диапазоне [2].

КП - код пикселя;

KX_m - отношение кода пикселя к энергетической яркости на входной апертуре ОПН в m -том эксперименте.

АЛГОРИТМ ПОСЛЕТАРТОВОЙ РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ ОПН КА

Энергетическая яркость Солнца в калибруемом диапазоне длин волн, приходящая от Солнца к верхней границе атмосферы, равна

$$W_{sc} = E \cdot [W(\lambda_{\max}) - W(\lambda_{\min})], \quad (1)$$

где $E = E_0 \cdot \frac{1}{\delta^2}$ - энергетическая яркость Солнца на верхней границе атмосферы во время съемки тестового объекта с заданными координатами и с учетом расстояния до Солнца, а $W(\lambda_{\min})$ и $W(\lambda_{\max})$ - доли энергетической яркости Солнца, приходящиеся на диапазон длин волн от 0 до границ калибруемого диапазона.

Для последующих расчетов необходимо использовать следующие величины: эксцентриситет эллипсоида Земли, равный

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

радиус эллипсоида Земли на средней широте между координатами тестового объекта и КА, рассчитываемый как

$$R_1 = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot (\sin(\frac{\phi_1 + \phi_2}{2}))^2}}. \quad (3)$$

Из (2) и (3) получаем расстояние по ортодромии между тестовым объектом и подспутниковой точкой КА:

$$L = R_1 \cdot \arctg\left(\frac{\sqrt{(\cos(\phi_2) \cdot \sin(\gamma_2 - \gamma_1))^2 + (\cos(\phi_1) \cdot \sin(\phi_2) - \sin(\phi_1) \cdot \cos(\phi_2) \cdot \cos(\gamma_2 - \gamma_1))^2}}{\sin(\phi_1) \cdot \sin(\phi_2) + \cos(\phi_1) \cdot \cos(\phi_2) \cdot \cos(\gamma_2 - \gamma_1)}\right). \quad (4)$$

С учетом (3) и (4) вычислим угол места КА во время съемки тестового объекта:

$$\beta = \arctg\left(\frac{(h + R_1) \cdot \cos\left(\frac{L}{R_1}\right) - R_1}{(h + R_1) \cdot \sin\left(\frac{L}{R_1}\right)}\right). \quad (5)$$

Тогда относительная масса атмосферы будет равна:

$$m = \cos \operatorname{esc}(\beta). \quad (6)$$

Относительная оптическая толщина атмосферы согласно закону Бугера - Ламберта - Бера равна:

$$\tau = -\ln\left(\frac{A}{W_{sc}}\right) \cdot \sin(\alpha). \quad (7)$$

Получив таким образом все необходимые данные, приступим к расчетам энергетических яркостей излучения в калибруемом диапазоне длин волн. Схема распространения солнечного излучения представлена на рис.2.

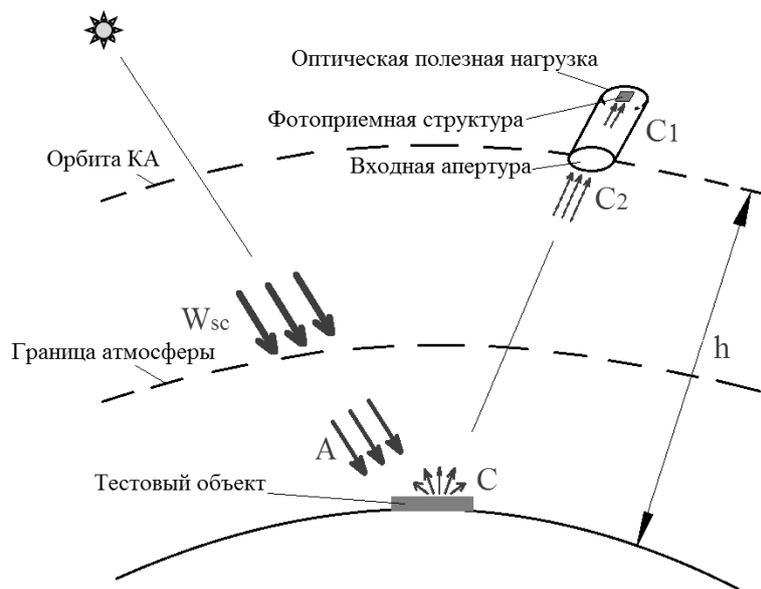


Рис.2. Схема распространения солнечного излучения

Энергетическая яркость излучения в калибруемом диапазоне длин волн, пришедшая от тестового объекта к чувствительному элементу фотоприемной структуры ОПН КА в приближении закона Бугера - Ламберта - Бера равна

$$C_1 = C \cdot \kappa_{ob} \cdot \frac{D^2}{4f_f^2} \cdot \exp(-\tau \cdot m), \quad (8)$$

или, с учетом (1, 6, 7, 8):

$$C_1 = C \cdot \kappa_{ob} \cdot \frac{D^2}{4 \cdot f_f^2} \cdot \exp\left(\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} \cdot \ln\left(\frac{A}{W_{sc}}\right)\right). \quad (9)$$

Мощность излучения, падающая на фокальную плоскость ОПН КА, равна [4]:

$$P_f = C_1 \cdot S_f = C_1 \cdot \frac{\pi \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot n^2}{4}.$$

Мощность излучения, падающая на входную апертуру ОПН КА, соответственно:

$$P_{ap} = \frac{P_f}{\kappa_{ob}} = \frac{C_1 \cdot \pi \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot n^2}{4 \cdot \kappa_{ob}}. \quad (10)$$

Из (10) энергетическая яркость излучения в калибруемом диапазоне длин волн, пришедшая от тестового объекта к входной апертуре ОПН КА и соответствующая значению кода пикселя, отображающего снятый объект, будет равна:

$$C_2 = \frac{P_{ap}}{S_{ap}} = \frac{C_1 \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot n^2}{\kappa_{ob} \cdot D^2}. \quad (11)$$

В предположении линейности калибровочной характеристики ОПН угол ее наклона может быть рассчитан, как:

$$KX_m = \frac{KP}{C_2}.$$

Как видно из (1) – (11), в алгоритме не используются данные о характеристиках атмосферы в момент съемки и альbedo снимаемого объекта. Влияние обратного рассеяния солнечного излучения атмосферой не учитывается вследствие его относительной малости. Влияние бокового подсвета, как было сказано, исключается путем соответствующего расположения измерительной аппаратуры на тестовых объектах и рационального выбора геометрических характеристик объектов. Таким образом, подход приобретает универсальность и удобен для результативного практического применения.

ВЫВОДЫ

Разработан алгоритм, позволяющий рассчитать долю энергетической яркости излучения тестового объекта, пришедшую к входной апертуре ОПН в калибруемом спектральном диапазоне, соответствующую значению кода пикселя, отображающего снятый объект и, как следствие, - значение точки текущей калибровочной характеристики ОПН.

После проведения многократных синхронных со съемкой измерений при различных значениях углов места КА и Солнца с помощью разработанного алгоритма может быть с заданной неопределенностью получена фактическая зависимость кода на выходе ОПН от энергетической яркости излучения, пришедшей от тестового объекта к входной апертуре ОПН (эксплуатационная калибровочная характеристика полезной нагрузки). Это позволит оценивать изменение характеристик ОПН КА при эксплуатации и на основании результатов калибровки формировать выходную продукцию высокого качества, с помощью которой потребитель сможет с высокой точностью определять альbedo снятых объектов и решать тематические задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. – Ленинград : Гидрометеиздат. 1984. – 751 с.
2. Solar constant and zero air mass solar spectral irradiance tables. STD.ASTM E490 REV A-ENGL 2000.
3. WEB-интерфейс Космической программы "HORIZONS", ssd.jpl.nasa.gov/horizons.cgi.
4. Джакония В.Е. Телевидение: Учебник для вузов / В.Е. Джакония, А.А. Гоголь, Я.В. Друзин. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2002. - 640 с.