

МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРА ОТРАЖЕНИЯ ВЫСОКООРБИТАЛЬНОГО ИСКУССТВЕННОГО СПУТНИКА ЗЕМЛИ

DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-11-14-20

Manuscript received 18 March 2020;
Accepted 28 July 2020

Федоренко Дмитрий Сергеевич,
Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского,
г. Санкт-Петербург, Россия,
dimaryk1988@mail.ru

Легков Константин Евгеньевич,
Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского,
г. Санкт-Петербург, Россия,
constl@mail.ru

Ключевые слова: спектр отражения,
спектрофотометрия, искусственный спутник
Земли, коэффициент отражения

Исследование высокоорбитальных искусственных спутников Земли, орбиты которых значительно удалены, является сложной проблемой астрономических наблюдений. В статье представлен подход к моделированию спектра отражения высокоорбитального искусственного спутника Земли на основе смешивания лабораторных спектров отражения материалов и покрытий, который позволяет воспроизводить спектральное распределение отраженного от ИСЗ потока оптического излучения в видимом диапазоне для дальнейшей обработки с целью качественной и количественной интерпретации спектров отражения. Созданная модель позволила получить и сравнить спектры отражения двух условных высокоорбитальных искусственных спутников Земли с одинаковым набором МиП, входящих в состав конструкции, но разными долями их содержания на видимой поверхности. Разработанная модель формирования спектра отражения позволяет адекватно воспроизводить спектральное распределение отраженного от ИСЗ потока оптического излучения в видимом диапазоне.

Информация об авторах:

Федоренко Дмитрий Сергеевич, адъюнкт, Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия
Легков Константин Евгеньевич, начальник кафедры, доцент, к.т.н., Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского, г. Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования:

Федоренко Д.С., Легков К.Е. Моделирование спектра отражения высокоорбитального искусственного спутника Земли // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №11. С. 14-20.

For citation:

Fedorenko D.S., Legkov K.E. (2020) Modeling of the High-Orbital Satellite Reflection Spectrum. *T-Comm*, vol. 14, no.11, pp. 14-20. (in Russian)

Введение

Исследование высокоорбитальных искусственных спутников Земли (ВИСЗ), орбиты которых значительно удалены, является сложной проблемой астрономических наблюдений. В частности, это выражается в том, что такие объекты трудно разрешить пространственно с использованием наземных телескопов, дифракционный предел разрешающей способности которых может быть рассчитан по критерию Рэля [1]:

$$\sin \theta = 1,22 \lambda / D \tag{1}$$

где θ является угловым разрешением оптической системы в радианах, λ – длина волны света в метрах, D – диаметр главного зеркала телескопа в метрах. Ввиду того, что расстояние до высокоорбитальных ИСЗ значительно превышает их размер, для упрощения выражения (1) можно использовать следующее приближение [2]:

$$d/z = 1,220 \lambda / D \tag{2}$$

где z – наклонная дальность ИСЗ в метрах, d – расстояние в метрах между двумя элементами конструкции ИСЗ, которые необходимо разрешить. В таблице 1 приведены расчеты зависимости диаметра главного зеркала телескопа от высоты орбиты ИСЗ при условии, что $d=0,1$ м и $\lambda=560$ нм (длина волны, соответствующая максимальной чувствительности человеческого глаза в дневное время [3]).

Таблица 1

Зависимость диаметра зеркала телескопа от высоты орбиты ИСЗ при разрешении конструктивных элементов на расстоянии 0,1 м друг от друга

Наклонная дальность ИСЗ z , км	Диаметр зеркала телескопа D , м
200	1,38
500	3,43
1000	,85
2000	3,7
20000	37

Из расчетов следует, что уже при высоте орбиты 2000 км для раздельного наблюдения компонентов ИСЗ, разнесенных на 0,1 м, необходим телескоп с диаметром зеркала 13,7 метров. Причем, это минимальное требование к размеру зеркала, не учитывающее атмосферные возмущения, которые часто гораздо значительно осложняют разрешение изображения. Создание зеркала такого размера практически неосуществимо, поэтому существующие методы [3,4,5] идентификации материалов внешних поверхностей ИСЗ на основе анализа их спектральных характеристик не всегда обеспечивают пространственное разделение конструктивных элементов и определение материалов, из которых они состоят. Это обстоятельство приводит к снижению эффективности идентификации орбитальных объектов, а также мониторинга околоземного космического пространства в целом [6].

Каждый конструктивный элемент ИСЗ (панели солнечных батарей, корпус, антенны, радиаторы и т.д.) покрыт определенным материалом [7]. Как показано на рис. 1, солнечный свет отражается от различных элементов конструкции, и излучение от каждого такого элемента объединяется в общий поток, в результате чего на пикселях ПЗС-приемника регистрируется суммированный сигнал от всех материалов и покрытий ИСЗ, видимых при данном ракурсе наблюдения.

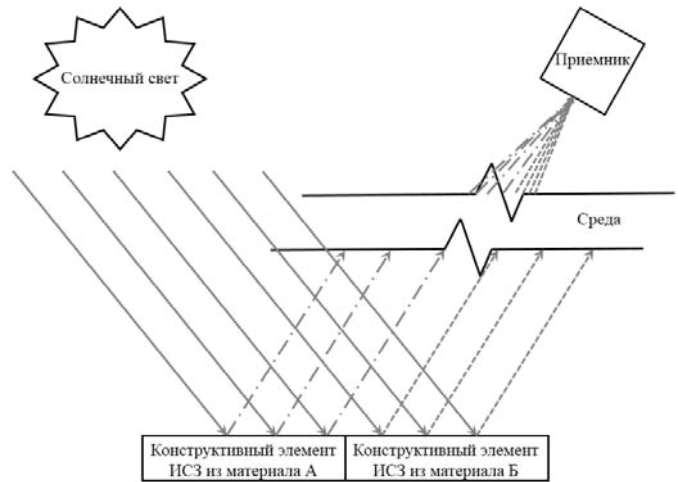


Рис. 1. Схематичное представление линейного смешивания спектра отражения

В [7] такая концепция получила название линейного смешивания спектра, но только для случая гиперспектральной съемки земной поверхности из космоса. В работе представлена модель спектра отражения высокоорбитального ИСЗ, регистрируемого наземным телескопом с ПЗС-спектрофотометром.

Такая модель позволит воспроизводить спектральное распределение отраженного от ИСЗ потока оптического излучения в видимом диапазоне для дальнейшей обработки с целью качественной и количественной интерпретации спектров отражения, что, в свою очередь, необходимо для более эффективного проведения идентификации наблюдаемых объектов.

Постановка задачи

В качестве исходных данных для моделирования спектра отражения высокоорбитального ИСЗ (СО ВИСЗ) предлагается использовать следующие параметры:

M - матрица материалов размерностью $m \times n$, в которой m – количество спектральных полос, в которых определены значения спектрального нормально-полусферического коэффициента отражения (СНПКО) МиП; n – количество МиП, присутствующих на видимой в момент наблюдения поверхности ИСЗ, элемент матрицы w_{ij} - значение спектрального коэффициента отражения j -го МиП в i -й спектральной полосе; P - матрица пропорций размерностью $n \times 1$, в которой элемент матрицы p_{j1} – доля содержания j -го МиП на видимой в момент наблюдения поверхности ИСЗ; N - аддитивный шум наблюдения, учитывающий влияние атмосферы, особенности приемника и т.д.

Необходимо сформировать спектр отражения высокоорбитального ИСЗ в условиях невозможности пространственного разрешения конструктивных элементов, выполненных из различных материалов, ввиду удаленности его орбиты.

Выходными данными модели СО ВИСЗ будут являться:

S - матрица сформированного спектра отражения высокоорбитального ИСЗ размерностью $m \times 1$.

В ходе моделирования использовались следующие ограничения и допущения:

- состояние атмосферы в конкретном сеансе наблюдения, а также особенности ПЗС-приемника известны и учтены:

$$N=0;$$

- ориентация видимых в момент наблюдения поверхностей ИСЗ совпадает с ориентацией образцов МиП во время лабораторных измерений их СНПКО;

- сумма долей содержания МиП видимых в момент наблюдения поверхностей ИСЗ равна 1:

$$\sum p_{j1} = 1;$$

- характер отражения поверхностью ИСЗ исключительно диффузный.

Разработка модели формирования спектра отражения высокоорбитального искусственного спутника земли

Модель строится на следующем допущении: если общая площадь видимой поверхности наблюдаемого объекта делится пропорционально в соответствии с долей содержания присутствующих на ней МиП, отраженное объектом излучение передает в тех же пропорциях характеристики соответствующих материалов. В этом смысле существует линейная связь между пропорциями МиП, составляющих видимую в

момент получения спектра поверхность, и спектром отраженного излучения.

Тогда умножение матриц M и P даст матрицу S, которая и будет являться полученным в результате наблюдения спектром отражения ИСЗ:

$$M_{m \times n} \times P_{n \times 1} + N = S_{m \times 1}$$

Согласно анализа, представленного в [8], современные спектрофотометры, установленные на отечественных наблюдательных средствах, используют от 130 до 150 спектральных полос и работают преимущественно в видимом диапазоне оптического излучения, поэтому для определенности примем количество спектральных полос $m=144$, левую границу спектра $\lambda_0=400$ нм и ширину спектра $\Delta=345$ нм.

Для формирования матрицы M используется база данных эталонных спектров отражения (БДЭСО), которая построена на основе [8].

Задачу моделирования СО ВИСЗ предлагается решать в соответствии со следующей схемой (рис. 2).

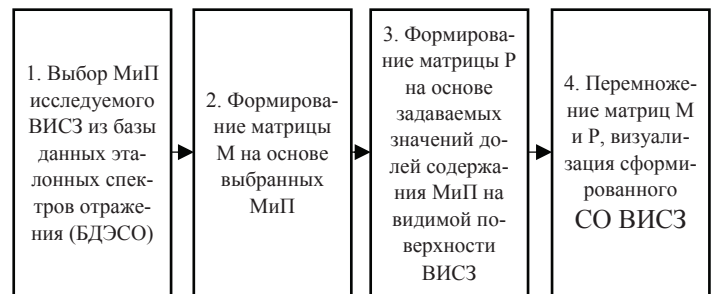


Рис. 2. Блок-схема моделирования СО ВИСЗ

Данная схема реализована в среде программирования LabView (рис. 3). Черными рамками выделены области, моделирующие соответствующие блоки схемы.

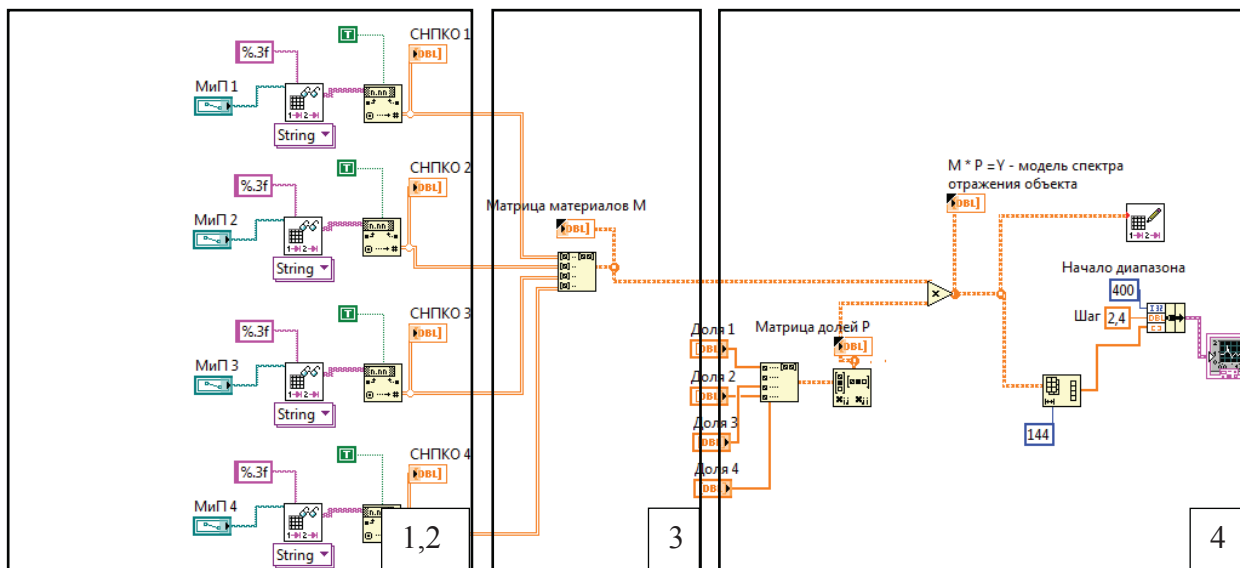


Рис. 3. Реализация модели формирования СО ВИСЗ в среде программирования LabView

Анализ результатов

Созданная модель позволила получить и сравнить спектры отражения двух условных ВИСЗ (рис. 4) с одинаковым набором МиП, входящих в состав конструкции, но разными долями их содержания на видимой поверхности. Рассмотрен случай, когда в состав спутника входят корпус, покрытый термозащитной пленкой ПЭТФ-ОА, две панели солнечных батарей с элементами из арсенида галлия (GaAs), антенна из полированного алюминия.

Условимся также, что панели солнечных батарей и антенны спутников имеют одинаковый размер, площадь корпуса ИСЗ-1 в два раза больше, чем площадь корпуса ИСЗ-2. Тогда доли содержания МиП на видимой поверхности исследуемых ИСЗ примут значения (табл. 2).

На рис. 5 представлены лабораторные спектры отражения выбранных МиП [10] и смоделированные спектры отражения ИСЗ-1 и ИСЗ-2.

Таблица 2

Доли содержания МиП для ИСЗ 1,2

	ИСЗ-1	ИСЗ-2
СБ	0,66	0,8
К	0,17	0,05
А	0,17	0,15

Из рисунка 5 видно, что спектры отражения, будучи близкими по форме, различаются по амплитуде, что вызвано различными пропорциями конструктивных элементов.

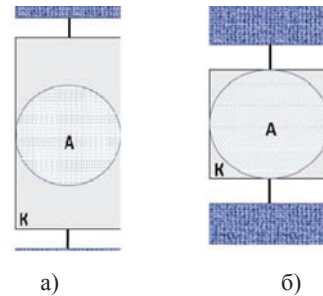


Рис. 4. Схематичное изображение исследуемых ВИСЗ: а) – ИСЗ-1; б) – ИСЗ-2. СБ – солнечные батареи, К – корпус, А – антенна

Таким образом, можно предположить, что на основе анализа спектров отражения можно различать спутники разных типов даже в том случае, когда они сконструированы на базе одинаковых МиП.

Рассмотрим обратный случай, когда конструктивные элементы совпадают по пропорциям, но различаются набором МиП. Для этого будем использовать спектр отражения ИСЗ 1 из примера выше, заменив материал СБ на кремний и оставив без изменения доли содержания МиП. Результаты моделирования представлены на рис. 6.

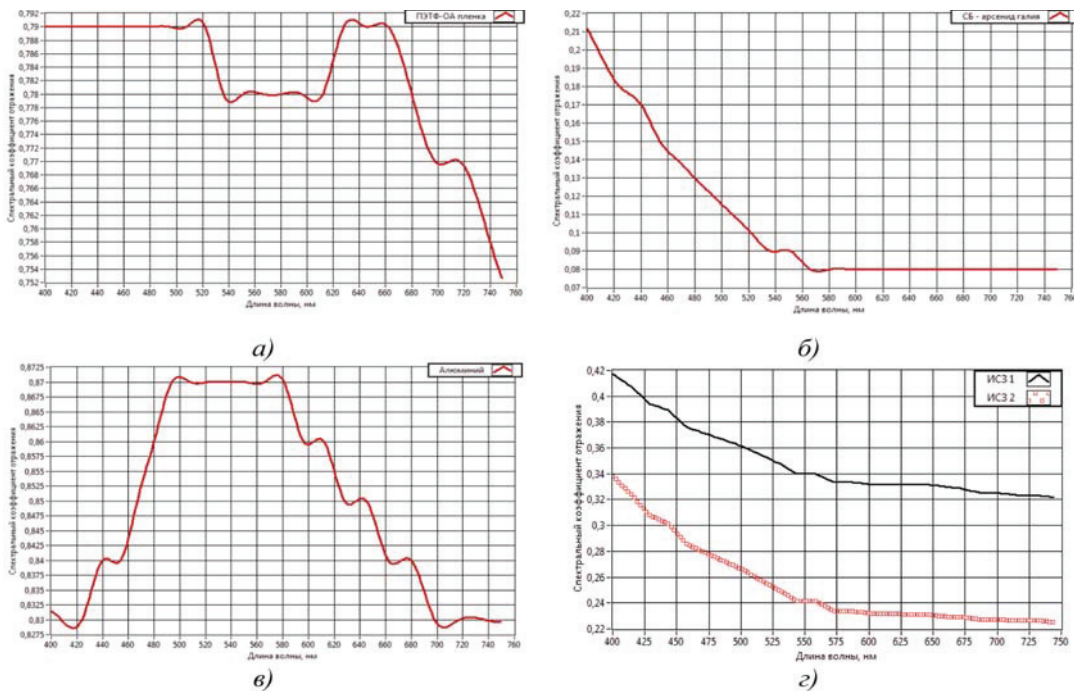


Рис. 5. Лабораторные спектры отражения МиП (а,б,в) и результаты моделирования спектров отражения ИСЗ-1 и ИСЗ-2 (г)

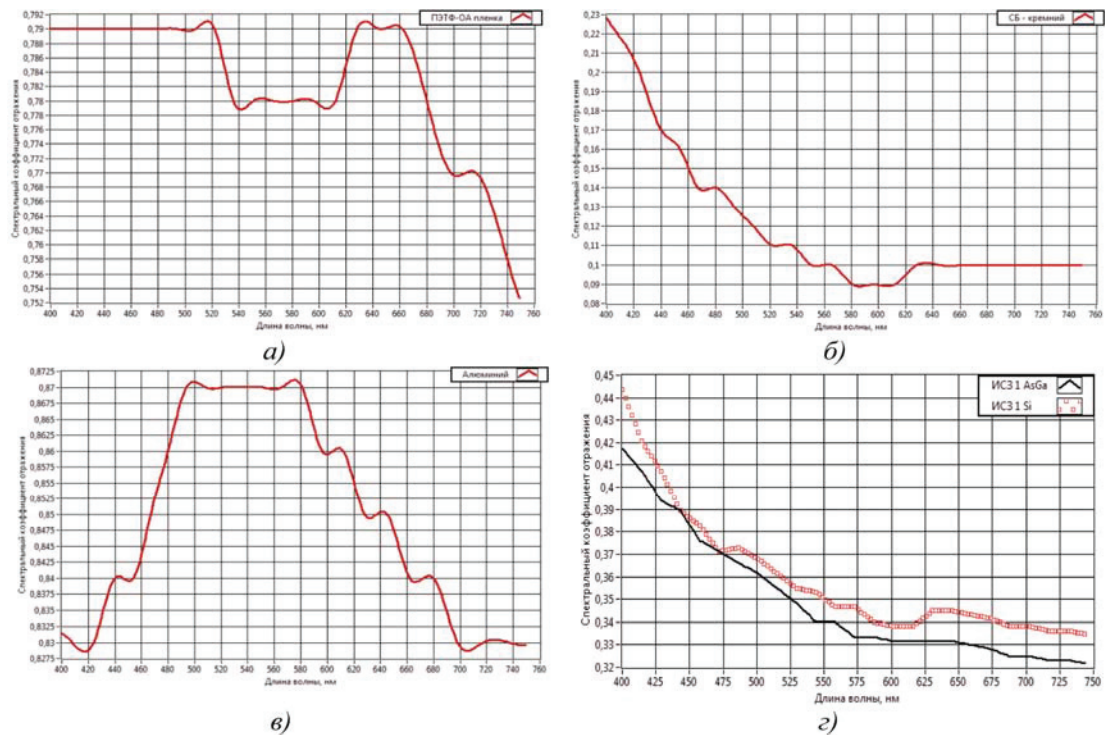


Рис. 6. Лабораторные спектры отражения МиП (а,б,в) и результаты моделирования спектров отражения ИСЗ 1 (г) с СБ из AsGa (сплошная) и Si (пунктирная)

Из рисунка 6 видно, что спектры отражения отличаются как по форме, так и по амплитуде, что объясняется наличием разных МиП в конструкции ИСЗ. Данный факт еще раз доказывает возможность применения спектрофотометрической информации для решения задач идентификации спутников.

Проверка адекватности разработанной модели

Для проверки адекватности разработанной модели, необходимо сравнить смоделированный спектр отражения космического объекта (КО), конструктивные особенности которого известны, со спектром, полученным в результате натурных исследований этого объекта наземным оптическим средством. При этом должны быть известны истинные доли содержания МиП на видимой в момент наблюдения поверхности КО, чтобы сформировать матрицу Р (блок 3 на рис. 2).

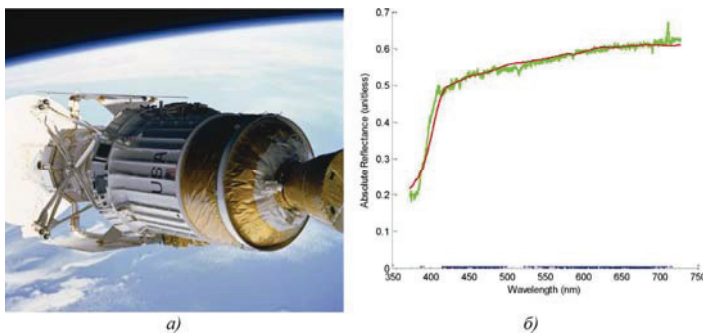


Рис. 7. Разгонный блок IUS: а) внешний вид; б) спектр отражения, полученный в ходе наблюдений наземным оптическим средством

В [2] представлены данные измерений наземными оптическими средствами спектральных характеристик американ-

ского разгонного блока (РБ) IUS (рис. 7), поэтому этот объект и был выбран для моделирования и последующего сравнения.

Кроме того, в [2] указаны априорные сведения об ориентации объекта, в соответствии с которыми были рассчитаны доли содержания МиП на видимой в момент наблюдения поверхности РБ IUS (табл. 3).

Таблица 3

МиП разгонного блока IUS

Оригинальные МиП	Доля содержания	Отечественные аналоги МиП
Carbon epoxy nozzle	0,55	Углепластик УП-ЦТ
IUS 23 midsection white paint	0,26	АК-573 белая
MLI gold-back	0,19	ПЭТФ-ОА (алюминизированная сторона)

Ввиду отсутствия в [10] отражательно-излучательных характеристик оригинальных МиП производства США, в моделировании были использованы их отечественные аналоги. Результаты представлены на рис. 8.

Из рисунка 8 видно, что оба спектра отражения идентичны по форме: в диапазоне 400-425 нм функция спектрального коэффициента отражения в обоих случаях резко возрастает, далее продолжает монотонно возрастать вплоть до правой границы спектра.

Разницу в амплитудных значениях можно объяснить тем, что МиП иностранного производства, очевидно, будут всегда отличаться по своим отражательно-излучательным характеристикам от отечественных аналогов [10].

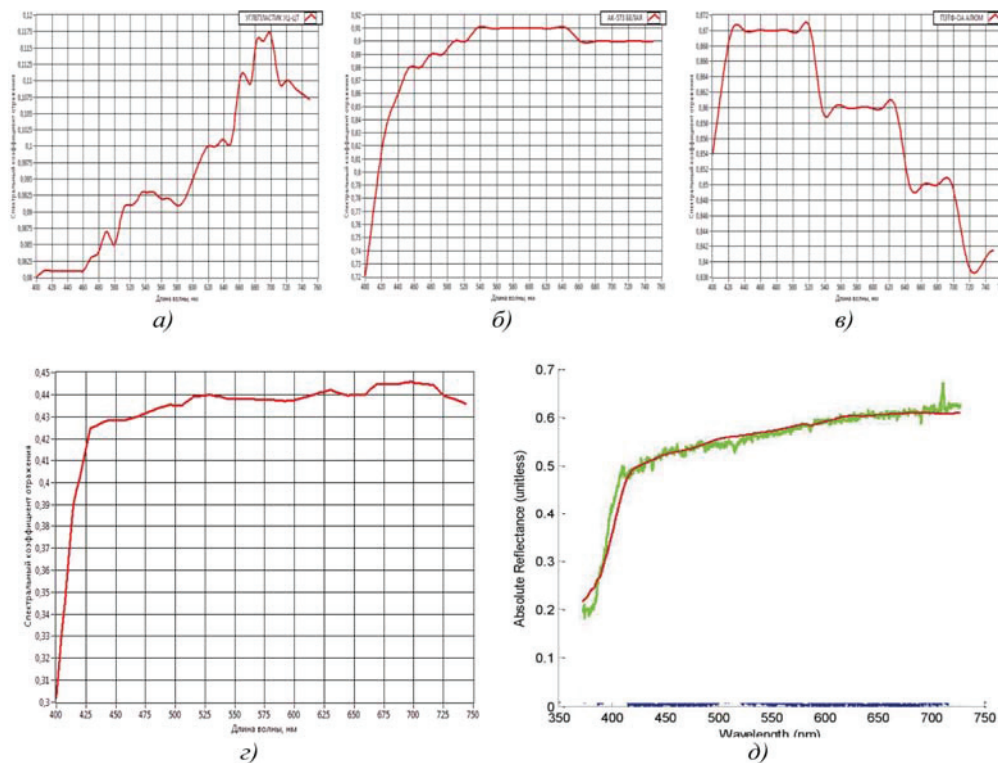


Рис. 8. Лабораторные спектры отражения МиП (а,б,в) и спектры отражения разгонного блока IUS: г) смоделированный; д) реальный

Таким образом, разработанная модель формирования спектра отражения позволяет адекватно воспроизводить спектральное распределение отраженного от ИСЗ потока оптического излучения в видимом диапазоне.

Заключение

Разработанная модель, в отличие от существующих, позволяет получить спектр отражения точечного объекта – высокоорбитального ИСЗ, конструкция которого включает несколько МиП. Полученные в ходе моделирования данные необходимы для создания и последующей верификации методик обработки спектрофотометрической информации, предназначенных для решения обратной задачи – по полученному телескопом спектру отражения ИСЗ определить состав и доли содержания МиП на видимой поверхности объекта.

Литература

1. *Курышев В.И.* Оптические наблюдения космических объектов. М.: Воениздат, 1973. 495 с.
2. *Jason B Rapp.* Identification of orbital objects by spectral analysis and observation of space environment effects. San Luis Obispo. 2012.
3. *Миронов А.В.* Основы астрофотометрии: учебное пособие. М.: Физматлит, 2005. 194 с. ISBN 5-9221-0935-9.
4. *Багров А.В., Выгон В.Г.* Оптические наблюдения объектов на геостационарной орбите // Околосземная астрономия (космический мусор). М.: Космосинформ, 1998. 278 с. С. 165-178. ISBN 5-900242-25-0.

5. *Логунов С.В., Черногубов А.В., Федоренко Д.С.* Определение конструктивных особенностей вращающегося геостационарного спутника на основе анализа двухцветных диаграмм // Вопросы радиоэлектроники, сер. «Техника телевидения». СПб.: НИИТ. 2018. Вып. 4. С. 34-41. ISSN 0492-5726.

6. *Муртазов А.К., Белошеников А.В., Курьянов В.В.* Создание каталога кривых блеска "типичных" моделей ГСС методом моделирования на ЭВМ // Набл. ИНТ. М.: Астрономический совет АН СССР. 1994. № 88. С. 54.

6. *Логунов С.В., Качуро А.М., Черногубов А.В., Колесник Д.Ю.* Совместная обработка и анализ некоординатной информации о геостационарном спутнике для определения конструктивных особенностей // Вопросы радиоэлектроники, сер. «Техника телевидения». СПб.: НИИТ, 2018. Вып. 2. С. 61-69. ISSN 0492-5726.

7. *Панасюк М.И., Новикова Л.С.* Модель космоса: научно-информационное издание: В 2 т. / Под ред. М.И. Панасюка. Т. 2: Воздействие космической среды на материалы и оборудование космических аппаратов. М.: КДУ, 2007. 1144 с. ISBN 978-5-98227-420-5.

8. *Keshava N. and Mustard J.F.* Spectral Unmixing // IEEE Signal Processing Magazine, no. January 2002, pp. 44-57, 2002.

9. *Логунов, С.В., Черногубов А.В., Федоренко Д.С.* Моделирование процесса спектрофотометрирования искусственного спутника Земли // Вопросы радиоэлектроники, сер. «Техника телевидения». СПб.: НИИТ. 2019. Вып. 1. С. 10-21. ISSN 0492-5726.

10. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014621706. Отражательно-излучательные характеристики материалов и покрытий объектов ракетно-космической техники в широком оптическом диапазоне / Каменев А.А., Полуян М.М., Солянов А.А., Честа О.И., Лебедев В.И. Зарегистрировано в Реестре баз данных 09.12.2014 г.

MODELING OF THE HIGH-ORBITAL SATELLITE REFLECTION SPECTRUM

Dmitriy S. Fedorenko, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, Saint Petersburg, Russia, dimaryk1988@mail.ru
Konstantin E. Legkov, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, Saint Petersburg, Russia, constl@mail.ru

Abstract

A version of the model for the formation of the reflection spectrum of a high-orbit satellite based on mixing laboratory reflection spectra of materials and coatings is presented, which allows reproducing the spectral distribution of the optical radiation stream reflected from the satellite in the visible range for further processing for the purpose of qualitative and quantitative interpretation of the reflection spectra.

Keywords: reflection spectrum, spectrophotometry, artificial Earth satellite, reflection coefficient.

References

1. Kuryshv V.I. Optical observations of space objects. Moscow: Military Publishing House, 1973. 495 p.
2. Jason B Rapp. Identification of orbital objects by spectral analysis and observation of space environment effects. San Luis Obispo. 2012.
3. Mironov A.V. The basics of astrophotometry: a training manual. Moscow: Fizmatlit, 2005. 194 p.
4. Bagrov A.V. Optical observations of objects in geostationary orbit . Near-Earth astronomy (space debris). Moscow: Cosmosinform, 1998 . P. 165-178.
5. Logunov S.V., Chernogubov A.V., Fedorenko D.S. Determination of design features of a rotating geostationary satellite based on the analysis of two-color diagrams. SPb.: NIIT, 2018. Vol. 4. P. 34-41.
6. Murtazov A.K., Beloshenkov A.V., Kupriyanov V.V. Creating a catalog of light curves of "typical" GSS models by computer simulation. M.: Astronomical Council of the USSR Academy of Sciences, 1994. No. 88. P. 54-65.
7. Logunov S.V. Joint processing and analysis of non-coordinate information about a geostationary satellite to determine design features. SPb.: NIIT, 2018. Vol. 2. P. 61-69.
8. Panasyuk M.I. Space Model: Scientific Information Edition: 2 vol.: The impact of the space environment on the materials and equipment of spacecraft. Moscow: KDU, 2007. 1144 p.
9. N. Keshava and J. F. Mustard, "Spectral Unmixing". *IEEE Signal Processing Magazine*, January 2002. P. 44-57.
10. Logunov S.V., Chernogubov A.V., Fedorenko D.S. Simulation of the process of spectrophotometry of an artificial Earth satellite. SPb.: NIIT. 2019 . Vol. 1. P. 10-21.
11. Kamenev A.A., Poluyan M.M., Soluyanov A.A., Chesta O.I., Lebedev V.I. Certificate of state registration of the database No. 2014621706. Reflective and radiative characteristics of materials and coatings of rocket and space technology objects in a wide optical range. Registered in the Register of Databases December 12, 2014.

Information about authors:

Dmitriy S. Fedorenko, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, postgraduate student, Saint Petersburg, Russia

Konstantin E. Legkov, Military Space Academy named after A.F. Mozhaisky, head of the Department, Saint Petersburg, Russia