

Плеханов Юрий Леонидович

кандидат военных наук, профессор Академии военных наук; старший преподаватель Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург.

Электронный адрес: plehanow69@yandex.ru

Yuriy L. Plekhanov

Ph.D. of Military Sciences, Professor at the Academy of Military Science; Senior Lecturer, A.F. Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg.

E-mail address: plehanow69@yandex.ru

Данилюк Богдан Александрович

кандидат технических наук, старший преподаватель Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург. SPIN-код: 1464-9662, AuthorID: 1116252.

Электронный адрес: vka@mil.ru

Bogdan A. Danilyuk

Ph.D. of Technical Sciences, Senior Lecturer, A.F. Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg. SPIN code: 1464-9662, AuthorID: 1116252.

E-mail address: vka@mil.ru

Шафигуллин Ильдар Шайхутдинович

кандидат технических наук, доцент, доцент Военно-космической академии имени А.Ф. Можайского, Санкт-Петербург.

Электронный адрес: vka@mil.ru

I'dar Sh. Shafigullin

Ph.D. of Technical Sciences, Docent, Associate Professor, A.F. Mozhaisky Military Space Academy, Saint Petersburg.

E-mail address: vka@mil.ru

МОДЕЛЬ ПРОГНОЗНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ВИДИМОСТИ КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА ПРИ НАБЛЮДЕНИИ ИЗ КОСМОСА

Аннотация. В статье предложен подход к прогнозированию видимости космического мусора в космическом пространстве, учитывающий реальное положение Солнца, Земли и искусственного спутника земли, приведен пример расчетов.

Ключевые слова: оптическая система, солнечный свет, космический мусор, мониторинг.

Для цитирования: Плеханов Ю.Л., Данилюк Б.А., Шафигуллин И.Ш. Модель прогнозного оценивания видимости космического мусора при наблюдении из космоса // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ, управление. 2025. № 1. С. 53 – 59. DOI: 10.18137/RNU.V9187.25.01.P.53

MODEL FOR PREDICTIVE ASSESSMENT OF THE VISIBILITY OF A SPACE DEBRIS WHEN IT OBSERVED FROM SPACE

Abstract. The article presents an approach to predicting the visibility of debris in outer space when observed from space vehicles, taking into account the actual position of the Sun, Earth and satellite. An example of calculation is given.

Keywords: optical system, sun light, space debris, monitoring.

For citation: Plekhanov Yu.L., Danilyuk B.A., Shafigullin I.Sh. (2025) Model for predictive assessment of the visibility of a space debris when it observed from space. *Vestnik of Russian New University. Series: Complex Systems: Models, analysis, management.* No. 1. Pp. 53 – 59. DOI: 10.18137/RNUV9187.25.01.P.53 (In Russian).

Введение

Количество космического мусора (далее – КМ) на околоземных орбитах стремительно возрастает и требует контроля [1–8]. КМ занесен в различные каталоги и постоянно отслеживается, но он может сталкиваться с другими объектами, что приводит к возникновению новых объектов КМ и/или смене их траектории, поэтому за ним необходимо постоянное наблюдение. Для наблюдения за объектами необходимо, чтобы они были видимы. Для планирования наблюдения за конкретным объектом КМ или областью необходимо определить время, когда КМ будут освещены солнцем. Анализ научных трудов показал, что подобная проблема не решена для случайно выбранной даты. В данной работе предлагается подход к моделированию освещенности КМ Солнцем, что делает ее актуальной.

Наблюдение за КМ с Земли имеет ряд ограничений, связанных с искажениями атмосферы, облачностью и временем суток. Наблюдение за КМ из космоса лишено данных недостатков, поэтому рассматривается как наиболее эффективная и перспективная система мониторинга.

Расчет возможных параметров КМ, влияющих на возможность обнаружения

Для моделирования оптического обнаружения КМ рассчитывается отраженный от него солнечный свет, блеск которого возможно измерить в виде видимой звездной величины [9; 10]. Данное решение позволяет оценить видимость КМ с заданными параметрами оптической системы. Возможности наблюдения КМ характеризуются наблюдаемой звездной величиной КМ, которая связана с расстоянием до него соотношением

$$m = -26,85 - 2,5 \log_{10} \left(\frac{\pi d^2 \gamma F(\varphi)}{4R^2} \right), \quad (1)$$

где d – диаметр поперечного сечения КМ; γ – коэффициент отражения; R – расстояние до КМ; $F(\varphi)$ – фазовая функция,

$$F(\varphi) = \frac{2}{3\pi^2} ((\pi - \varphi) \cos(\varphi) + \sin(\varphi)); \quad (2)$$

φ – угол освещения КМ Солнцем [10].

Взаимосвязь угла освещения КМ Солнцем и его видимой звездной величины для диаметра поперечного сечения КМ 1,5 м и коэффициента отражения КМ 0,5 на удалении в 1000 км приведена в Таблице.

Таблица

Зависимость видимой звездной величины от угла освещения

m	4,98	5,00	5,11	5,27	5,51	5,81	6,21	7,37	8,26	45,99
φ	10	15	30	45	60	75	90	120	135	180

Источник: таблица составлена авторами на основе выражений (1) и (2).

Анализ таблицы показывает, что угол освещения КМ Солнцем при прочих равных значениях во многом влияет на его обнаружение и требует обязательного учета при моделировании.

Теоретический расчет угла освещения космического мусора Солнцем

Приведенное ранее выражение требует знания угла, под которым выбранный объект КМ или область пространства освещены Солнцем. Но возникает сложность в определении положения Солнца, поскольку это связано с расчетом точной даты [11] и последующим переводом полученных координат, поскольку для правильного расчета все объекты должны быть привязаны к единой координатной системе. Для этого следует выполнить ряд шагов.

1. Расчет долготы перигелия (ω). Перигелий – это точка на орбите Земли, ближайшая к Солнцу. Его долгота изменяется со временем из-за прецессии земной орбиты. Для расчета долготы перигелия на заданную дату можно использовать формулу

$$\omega = \omega_0 + (\omega_{\text{dot}} D),$$

где ω_0 – долгота перигелия на начальную дату; ω_{dot} – скорость прецессии перигелия (градусы в день); D – количество дней от начальной даты.

2. Расчет средней аномалии M . Средняя аномалия представляет собой угол между перигелием и текущим радиус-вектором Земли, измеренный в плоскости орбиты, и рассчитывается по формуле

$$M = M_0 + (nD), \quad (3)$$

где M_0 – средняя аномалия на начальную дату; n – среднее движение (градусы в день); D – количество дней от начальной даты.

3. Расчет эксцентрической аномалии E . Эксцентрическая аномалия связана со средней аномалией M и эксцентриситетом орбиты Земли. Определяется из уравнения Кеплера, которое выражает баланс между гравитационной силой и центростремительной силой в плоскости орбиты. Уравнение Кеплера выглядит следующим образом:

$$M = E - e \cdot \sin(E),$$

где M – средняя аномалия для заданного момента времени; E – эксцентрическая аномалия, которую нужно найти; e – эксцентриситет орбиты Земли.

Для нахождения эксцентрической аномалии E из уравнения Кеплера обычно используются численные методы, такие как метод Ньютона или метод деления пополам. Один из самых распространенных методов – это метод Ньютона, который использует итерационный процесс для нахождения корней уравнения.

Процесс нахождения эксцентрической аномалии методом Ньютона выглядит следующим образом.

Начальное приближение. Выбирается начальное приближение для эксцентрической аномалии E . Это может быть любое значение, но обычно выбирается значение, близкое к средней аномалии M .

Итерационный процесс. Повторяются следующие шаги до достижения необходимой точности:

- вычисляется значение функции $f(E) = E - e \cdot \sin(E)$ и ее производной $f'(E) = 1 - e \cdot \cos(E)$;

- корректируется значение эксцентрической аномалии по формуле

$$E_{\text{новое}} = E_{\text{старое}} - f'(E_{\text{старое}}) \cdot f(E_{\text{старое}}); \quad (4)$$

• проверяется достижение необходимой точности; если условие точности выполнено, то процесс завершается, и найденное значение эксцентрисической аномалии считается конечным результатом.

Этот процесс повторяется до тех пор, пока разница между последовательными значениями эксцентрисической аномалии не станет меньше заданной точности. Полученное значение эксцентрисической аномалии E затем используется в дальнейших расчетах для определения эклиптических координат.

4. Расчет эклиптических координат λ и β . Эклиптические координаты λ и β Солнца могут быть рассчитаны из долготы перигелия ω , средней аномалии M и эксцентрисической аномалии E с использованием следующей формулы:

$$\Lambda = M + (2e \cdot \sin(M)) + \omega, \quad (5)$$

где e – эксцентриситет орбиты Земли; $\beta = 0$

Используя эти формулы, можно рассчитать эклиптические координаты Солнца на заданную дату. Эти координаты позволяют определить положение Солнца на эклиптике в заданный момент времени.

5. Радиус-вектор (расстояние до Солнца). Радиус-вектор r представляет расстояние от Земли до Солнца. Для его расчета можно использовать формулу

$$r = a(1 - e^2)/(1 + e \cdot \cos(v)), \quad (6)$$

где a – большая полуось орбиты Земли; e – эксцентриситет орбиты; v – истинная аномалия.

6. Истинная аномалия. Истинная аномалия v – угол между перигелием (точкой на орбите, ближайшей к Солнцу) и радиус-вектором Земли, измеренный в плоскости орбиты. Рассчитывается с помощью формулы

$$\tan(v/2) = 1 - e + e \cdot \tan(E/2), \quad (7)$$

где E – эксцентрисическая аномалия.

Для преобразования эклиптических координат λ , β Солнца в экваториальные координаты x , y , z в экваториальной геоцентрической системе координат можно воспользоваться преобразованиями, основанными на углах наклона небесной сферы.

А) Вычисление прямого восхождения (RA) и склонения (Dec). Прямое восхождение (RA) и склонение (Dec) являются экваториальными координатами, определяющими положение объекта на небесной сфере:

$$RA = \arctan2(\sin(\lambda) \cdot \cos(\epsilon) - \tan(\beta) \cdot \sin(\epsilon), \cos(\lambda)); \quad (8)$$

$$Dec = \arcsin(\sin(\beta) \cdot \cos(\epsilon) + \cos(\beta) \cdot \sin(\epsilon) \cdot \sin(\lambda)), \quad (9)$$

где λ – эклиптическая долгота Солнца; β – эклиптическая широта Солнца; ϵ – наклон эклиптики к экватору Земли.

Б) Преобразование в декартовы координаты. Полученные RA и Dec являются сферическими координатами. Для преобразования их в декартовы координаты (x, y, z) можно воспользоваться следующими формулами:

$$x = \cos(RA) \cdot \cos(Dec); \quad (10)$$

$$y = \sin(RA) \cdot \cos(Dec); \quad (11)$$

$$z = \sin(Dec). \quad (12)$$

После применения этих формул получим координаты Солнца в экваториальной геоцентрической системе координат, где ось x направлена к весеннему равноденствию, ось y находится в направлении прямого восхождения 90 град от весеннего равноденствия, а ось z направлена в сторону полюса Земли.

Моделирование угла освещения космического мусора Солнцем

Для упрощения расчетов на языке программирования Python была разработана программа, в которой формируется трехмерное пространство: в нулевых координатах размещается Земля, около нее размещается космический аппарат-наблюдатель и объект КМ, положение которых задается с помощью кеплеровых элементов орбиты, Солнце, положение которого определяется с учетом дат по Юлианскому календарю. Затем производятся требуемые расчеты.

Основными этапами расчетов являются:

- расчет времени;
- расчет положения космических объектов (аппарат-наблюдатель и КМ);
- преобразование кеплеровых элементов в прямоугольные координаты XYZ;
- формирование функции для вычисления угла между двумя векторами;
- вычисление угла освещенности КМ Солнцем с космического аппарата-наблюдателя по выражению (2);
- расчет наблюдаемой звездной величины по выражению (1).

Проверка работоспособности кода

По результатам работы программы получаем значения положения Солнца и искусственного спутника Земли относительно Земли, а также значения углов освещенности заданного КМ (см. Рисунок).

Данные относительно угла обзора и видимой звездной величины выводятся в командной строке:

«Угол освещенности космического мусора Солнцем относительно КА наблюдателя: 155,59 градусов».

«Видимая звездная величина КМ при наблюдении с КА наблюдателя 11,23 m».

Адекватность полученных значений была проверена для искусственно заданных значений положений Солнца, космического аппарата-наблюдателя и КМ с использованием специального программного обеспечения Satellite Toolkit 8.0, расхождение полученных значений менее 0,1 %.

Таким образом, адекватность программы и заложенных в нее моделей подтверждена.

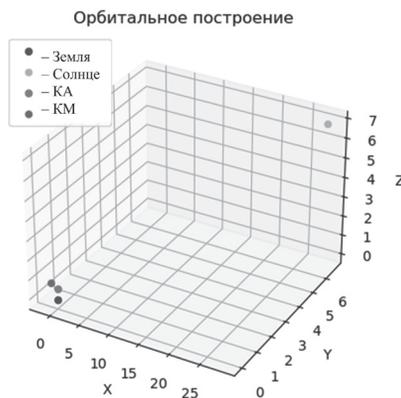


Рисунок. Пример графической отработки программы

Источник: рисунок выполнен авторами.

Заключение

Моделирование и расчет угла освещенности КМ являются важной научной задачей, а предложенный аппарат позволяет быстро и с достаточной точностью получить данные значения для выбранного времени. Однако следует учитывать, что при рассмотрении данной модели не учитывается влияние отраженного от Луны света, который может «ослепить» оптическую систему, а также то, что в процессе движения КМ по орбите вокруг Земли периодически могут возникать ситуации, когда КМ попадает в тень Земли, что приводит к резкому падению освещенности. Учет влияния данных факторов является направлением дальнейшего совершенствования модели.

Литература

1. Кирюхина В.А., Антипин С.О., Онищенко Н.С. Космический мусор // Ломоносов-2019 : Материалы XXVI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2019», Севастополь, 03–05 апреля 2019 года / Под ред. О.А. Шпырко, В.В. Хапаева, С.И. Рубцовой. Севастополь : Филиал МГУ в г. Севастополе, 2019. С. 269–270. EDN EBSUSP.
2. Fuad H. Space debris and the lunar perspective // *Endless light in science*. 2022. No. 4-4. С. 132–134. EDN MOJZQS. DOI: 10.24412/2709-1201-2022-132-134
3. Мануйлов С.А. Космический мусор – угроза безопасности космических полетов // Проблемы безопасности полетов. 2021. № 9. С. 35–53. EDN CDPARU. DOI: 10.36535/0235-5000-2021-09-3.
4. Кисиленко В.С., Макаров Н.Ю., Марчук В.А., Яковлев М.В. Космический мусор в области низких околоземных орбит и эффект Кесслера // *Космонавтика и ракетостроение*. 2022. № 2 (125). С. 89–98. EDN PRQRUI.
5. Денисов А.М., Корнилов А.В., Хубларова Т.С., Бабин А.М. Исследование влияния космического мусора на функционирование параболических антенн космических аппаратов // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2020. № 11. С. 203–208. EDN GLIRFI.
6. Поляков В.В., Дашкин Э.Р. Методика обнаружения малоразмерного космического мусора телевизионной системой // *Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения*. 2021. № 4. С. 61–68. EDN PCFEQN.
7. Данилова Т.В., Архитова М.А., Маслова М.А. Астрономический автономный метод слежения за космическими аппаратами // *Труды Института прикладной астрономии РАН*. 2020. № 52. С. 17–22. EDN ERDTLM.
8. Емельянов В.А., Маслов В.В. Апробация алгоритмов моделирования наблюдения бортовой оптико-электронной камерой фрагментов космического мусора на эллиптической орбите // *Космонавтика и ракетостроение*. 2020. № 3 (114). С. 5–11. EDN RSCTIE.
9. Молотов И.Е., Агапов В.М., Стрельцов А.И. и др. Проблемы оптического мониторинга космического мусора // *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*, 2020. № 7. С. 1–17. EDN FUOSLS. DOI: 10.20948/prepr-2020-7
10. Коробцев И.В., Мишина М.Н. Оптические наблюдения малых космических аппаратов и космического мусора в Саянской обсерватории // *Солнечно-земная физика*. 2019. Т. 5. № 4. С. 117–121. EDN EFWNJС. DOI: 10.12737/szf-54201913
11. Бакулин, П.И., Кононович, Э.В., Мороз, В.И. Курс общей астрономии. 4-е изд. М. : Наука, 1977. 541 с.

References

1. Kiryukhina V.A., Antipin S.O., Onishchenko N.S. (2019) Space debris. In: Shpyrko O.A., Kha-paev V.V., Rubtsova S.I. (Eds) *Lomonosov-2019* [Lomonosov-2019] : Proceedings of the XXVI International Scientific Conference of students, postgraduate students and young scientists. Sevastopol, April 03–05, 2019. Sevastopol : MSU Branch in Sevastopol Publ. Pp. 269–270. (In Russian).
2. Fuad H. (2022) Space debris and the lunar perspective. *Endless light in science*. No. 4-4. Pp. 132–134. DOI: 10.24412/2709-1201-2022-132-134
3. Manuilov S.A. (2021) Space garbage a threat to the safety of space flights. *Flight Safety Problems*. No. 9. C. 35–53. EDN CDPARU. DOI: 10.36535/0235-5000-2021-09-3 (In Russian).
4. Kisilenko V.S., Makarov N.Yu., Marchuk V.A., Yakovlev M.V. (2022) Space debris in the region of low earth orbits and the Kessler effect. *Cosmonautics and Rocket Engineering*. No. 2 (125). Pp. 89–98. (In Russian).
5. Denisov A.M., Kornilov A.V., Khublarova T.S., Babin A.M. (2020) Analysis of the influence of space debris on the functioning of parabolic antennas of spacecraft. *Izvestiya of Tula State University. Technical sciences*. No. 11. Pp. 203–208. (In Russian).
6. Polyakov V.V., Dashkin E.R. (2021) Small-size detection technique space debris television system. *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya* [Radio electronics. Series: Television technology]. No. 4. Pp. 61–68. (In Russian).
7. Danilova T.V., Arkhipova M.A., Maslova M.A. (2020) Autonomous astronomical method of spacecraft tracking. *Proceedings of the Institute of Applied Astronomy of the Russian Academy of Sciences*. No. 52. Pp. 17–22. (In Russian).
8. Emel'yanov V.A., Maslov V.V. (2020) Approbation of simulation algorithms for observation of space debris fragments in elliptical orbit with an on-board optoelectronic camera. *Cosmonautics and rocket Engineering*. No. 3 (114). Pp. 5–11. (In Russian).
9. Molotov I.E., Agapov V.M., Strel'tsov A.I. (2020) Problems of optical monitoring of space debris. *Keldysh Institute Preprints*. No. 7. Pp. 1–17. DOI: 10.20948/prepr-2020-7 (In Russian)
10. Korobtsev I.V., Mishina M.N. (2019) Optical observations of small spacecraft and space debris at the Sayan Observatory. *Solnechno-Zemnaya Fizika* [Solar-Terrestrial Physics]. Vol. 5. No. 4. Pp. 117–121. DOI: 10.12737/szf-54201913 (In Russian).
11. Bakulin P.I., Kononovich E.V., Moroz V.I. (1977) *Kurs obschei astronomii* [General astronomy course]. 4th edition. Moscow : Nauka Publ. 541 p. (In Russian).

Поступила в редакцию: 31.01.2025

Received: 31.01.2025

Поступила после рецензирования: 21.02.2025

Revised: 21.02.2025

Принята к публикации: 06.03.2025

Accepted: 06.03.2025