

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ БЛЕСКА КОСМИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

к.т.н. А.М. Резниченко, к.ф.-м.н. В.А. Ямницкий, И.И. Мишура
(представил д.т.н., проф. Л.Ф. Купченко)

Рассматриваются математические и программные аспекты имитационной модели блеска космических объектов. Описаны подходы к созданию оптико-геометрических форм космических объектов, заданию отражательных характеристик элементов поверхности космических объектов. Решена задача моделирования вращения космического объекта вокруг центра масс в сочетании с моделированием реальных сеансов наблюдения. Представлены примеры модельных кривых блеска.

Постановка проблемы. Вопросы некоординатных наблюдений космических объектов привлекают все большее внимание исследователей околоземного космического пространства в связи с нарастающими темпами освоения космоса, а также существующей аварийностью КА. Значительный вклад в актуальность этих наблюдений вносит проблема космического мусора и астероидно-кометной опасности. В настоящее время благодаря быстрому развитию вычислительной техники появилась возможность исследования некоординатных характеристик искусственных космических объектов (ИКО) на основе имитационного моделирования их геометрической формы, отражательных характеристик поверхности и реальных условий наблюдения. Моделирование некоординатных характеристик ИКО в сочетании со статистическими рядами наблюдений позволяет существенно повысить эффективность распознавания объектов, классификации нештатных ситуаций на борту, а также решения ряда задач военного характера.

Анализ литературы. В работах [1, 2, 4] приведены модели оптико-отражательных характеристик ИКО, находящихся на геостационарных орбитах. В работе [3] разработана математическая модель объектов сложной формы, находящихся в естественных условиях освещения в атмосфере Земли. Авторы [4] сообщают о проведении комплекса работ, посвященных общему подходу к дистанционной диагностике характеристик и технического состояния КА с помощью телескопов и опирающихся на существенный задел в области математических моделей сигнальных характе-

ристик для различных условий полета объекта. Анализ показал, что в основном геометрия объектов описывается в виде тел вращения (цилиндр, сфера и т. д.) [1, 2] либо набором плоских площадок [3, 4], аппроксимирующих тело объекта различными методами (мозаичный; компьютерного синтезирования и т. д.), а движение задается только 3-х видов: вращение ИКО относительно центра масс в трех плоскостях. Таким образом, представленные модели не позволяют исследовать динамику отражательных характеристик ИКО, находящихся на орбитах отличных от геостационарных, с привязкой к реальным виткам пролета в зоне обнаружения оптического средства.

Целью данной работы является создание динамической имитационной модели блеска ИКО, результатом которой были бы модельные ряды блеска, полученные для реально существующих оптических средств наблюдения на реальных витках полета ИКО с заданными исследователем геометрической формой, отражательными характеристиками поверхности и параметрами вращения ИКО вокруг центра масс.

В настоящей статье описан подход к решению этой задачи, ее программная реализация и первые результаты.

Навигационно-баллистическая модель движения ИКО. Исходными данными для построения орбитальной модели движения ИКО являются:

- вектор орбиты КО в формате TLE, общедоступный из сети Internet;
- геодезические координаты пункта наблюдения;
- технические характеристики оптико-электронного средства, стоящего в пункте наблюдения (минимальный угол места, углы разворота телескопа по азимуту, тип монтировки телескопа и некоторые другие, позволяющие получать вспомогательную информацию о прохождении ИКО в зоне наблюдения).

Процесс вычисления координат ИКО реализован с помощью решения дифференциальных уравнений движения ИКО, учитывающих гармоники поля тяготения Земли вплоть до 4-й, торможение верхней атмосферы, солнечно-лунные перетуберационные ускорения и световое давление.

Ориентация ИКО относительно наблюдателя (оптико-электронного средства – ОЭС) учитывает не только координаты ИКО и ОЭС, но и процесс "свободного вращения" ИКО, который также моделируется с помощью решения дифференциальных уравнений вращения твердого тела.

Оптико-геометрическая модель космического объекта. Задание трехмерной геометрической формы и отражательных характеристик элементов поверхности ИКО является одной из основных задач модели.

При построении трехмерной геометрической формы ИКО используется

математический аппарат ориентированных графов [5]. Объект задается множеством вершин \mathbf{K} и набором ребер \mathbf{L} . Нумеруя вершины \mathbf{K} и ребра \mathbf{L} , тело объекта задается матрицей импидантности $|a_{ij}|$ размером $\mathbf{n} \times \mathbf{m}$ [1], где

$$a_{ij} = \begin{cases} +1, & \text{если ребро } L_j \text{ исходит из } K_i; \\ -1, & \text{если ребро } L_j \text{ заходит в } K_i. \end{cases} \quad (1)$$

Описание объекта строится «иерархически»: объект разбивается на простые геометрические тела, затем описываются грани, ребра и вершины каждого тела. Причем, геометрическая модель изображения КО обязательно должна содержать так называемое «базовое тело», к которому в процессе построения изображения объекта в целом приписываются остальные тела (рис. 1).

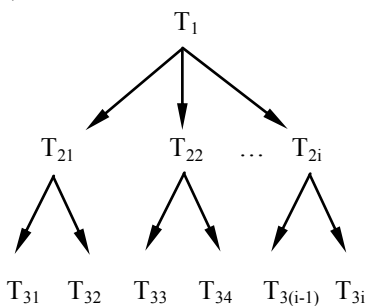


Рис. 1. Принцип построения тела космического объекта:
 T_1 – «базовое тело»;
 $T_{21}, T_{22}, \dots, T_{2i}$ – вторичные тела;
 $T_{31}, T_{32}, \dots, T_{3i}$ – третичные тела ($i = 1 \dots n$)

Информация, реализующая описание объекта, располагается в массивах, содержащих "индексные ссылки" вида "тело → грань → ребро → вершина". Такой принцип построения тела КО позволяет синтезировать объекты достаточно сложной формы. На рис. 2 для примера показаны реальное изображение КА №92052А ТОРЕХ/Poseidon и его синтезированная трехмерная модель.



Рис. 2. Изображение КА и его трехмерной модели

Оптические свойства граней поверхности КО. В качестве матери-

ала для внешней обшивки и выносных конструкций КО [6] применяются металлы (алюминий, сталь, титан), полупроводники для солнечных батарей, различные покрытия (краски, лаки, ткани, элементы металлизированной экранно-вакуумной теплоизоляции), задачей которых является рассеяние солнечного излучения в пространство с соответствующими характеристиками отражения и теплового излучения.

При построении фотометрического изображения объекта предполагается, что объект протяженный и яркость каждой грани рассчитывается в зависимости от характера отражающей поверхности. Для каждого тела поверхности ИКО задается закон рассеяния солнечного излучения (диффузный или зеркальный) и альbedo.

Яркость площадки в пределах всей полусферы для случая диффузного отражения есть величина постоянная и равна [7]:

$$L = \frac{d\Phi_{\text{пад}}\beta_{\text{диф}}}{\pi \cdot dS_i}, \quad (2)$$

где $d\Phi_{\text{пад}}$ – поток солнечного излучения, поглощенный площадкой dS_i ; dS_i – элементарная площадка; $\beta_{\text{диф}}$ – коэффициент отражения поверхности (альbedo).

Так как $d\Phi_{\text{пад}} = IdS_i \cos p/R^2$, где I – сила падающего на площадку dS_i излучения; p – угол падения солнечного излучения [8], для диффузно отражающей поверхности получаем (рис. 3):

$$L = \frac{I \cdot \beta_{\text{диф}} \cos p}{\pi}. \quad (3)$$

Для зеркального отражения яркость элементарной площадки S_i зависит от ширины зеркального пика (рис. 4):

$$L = \frac{I \cdot \beta_3}{\pi \cdot \alpha^2}, \quad (4)$$

где α – полуширина зеркального пика; β_3 – коэффициент зеркального

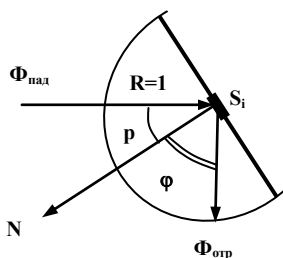


Рис. 3. Пояснение к выражению определения яркости отражающей элементарной площадки

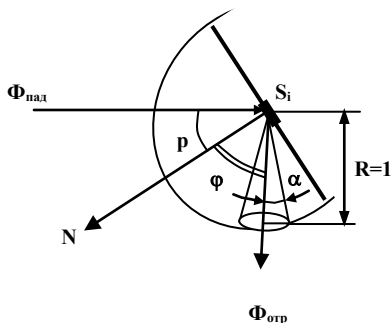


Рис. 4. Пояснение к выражению определения яркости зеркально отражающей элементарной площадки

отражения.

Далее, используя градации яркости ПЭВМ ($color = 256$ градаций), задаем яркость диффузного отражения в линейном ($2 \div 127$) и яркость зеркального отражения ($128 \div 256$) в логарифмическом масштабе, приравнивая $color = f(L)$. На мониторе для наглядности отображается практически вся предположительно видимая поверхность объекта, т.е. даже та поверхность, которая повернута в сторону наблюдателя, но не отражает свет в этом направлении.

Эффективная яркость изображения рассчитывается по формуле

$$f(L) = \frac{S_{\text{эф}}}{\sum dx dy \cdot M^2},$$

откуда

$$S_{\text{эф}} = \sum dx dy \cdot M^2 \cdot f(L), \quad (5)$$

где $S_{\text{эф}}$ – видимая площадь поверхности объекта; dx, dy – размеры пикселя; M – масштаб отображения объекта на мониторе; $f(L)$ – фактическая яркость пикселя изображения, восстановленная по цвету $color$.

Суммирование ведется по всей площади изображения на дисплее, за вычетом фона неба и неосвещенных площадок.

Благодаря реализованному принципу построения объекта, автоматически решается проблема "экранирования" или "взаимного затенения" тел, т.е. участки "базового" тела, перекрытые "вторичными", "третичными" телами (или наоборот), программно "затираются" и не участвуют в процессе вычисления видимой площади объекта.

Расчет блеска искусственного космического объекта и построение фотометрической кривой (кривой блеска) производится согласно выражению [9]:

$$m = c - 2.5 \log \cdot \frac{S_{\text{эф}} \cdot \tau_a^{1/\cos z}}{\pi \cdot R^2}, \quad (6)$$

где m – блеск космического объекта; c – звездная величина Солнца, равная $-26^m.78$; $S_{\text{эф}}$ – эффективная площадь рассеяния (в модели – видимая площадь поверхности объекта (5)); τ_a – коэффициент прозрачности атмосферы; z – зенитный угол, который отсчитывается от зенита точки стояния ОСН до направления на объект; R – наклонная дальность до искусственного космического объекта.

Основные характеристики имитационной модели. В имитационной модели блеска космических объектов реализованы следующие основные характеристики:

– высота орбиты моделируемого искусственного космического

объекта – от 200 до 40 тыс. км;

- общее число вершин тел, описывающих геометрическую форму искусственного космического объекта – до 1500;

- быстродействие процесса прогнозирования движения искусственного космического объекта (для процессора с частотой 500 МГц) – около 10 тыс. шагов в секунду;

- быстродействие процесса построения геометрической формы тела (для процессора с частотой 500 МГц и тела, описываемого 600 вершинами) – около 15 шагов в секунду.

Входными данными для модели являются:

- прогноз времени пролета искусственного космического объекта в зоне обнаружения ОЭС (интересующий интервал времени, дата пролета);

- координаты точки стояния ОЭС.

Программа математической модели **позволяет оперативно вносить изменения**:

- в вектор состояния искусственного космического объекта;

- параметры стабилизации и ориентации моделируемого космического объекта;

- отражательные характеристики поверхности объекта.

В качестве **выходных данных** математической модели представлены:

- кривая блеска $m(t)$ за время пролета искусственного космического объекта в зоне обнаружения ОЭС (рис. 5);

- изображение ИКО на мониторе с информацией о:

- номере витка (Nv);

- изменении наклонной дальности до КО (Sv);

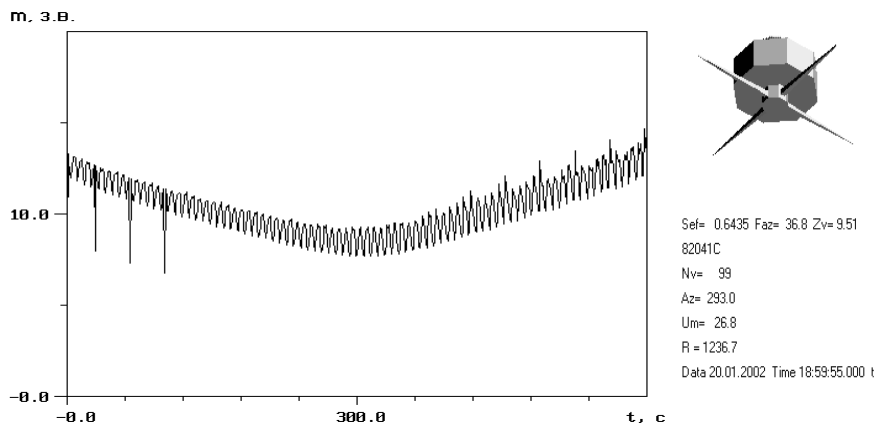
- изменении эффективной площади рассеяния (Sef);

- изменении фазового угла (Faz), азимута (Az), угла места (Um).

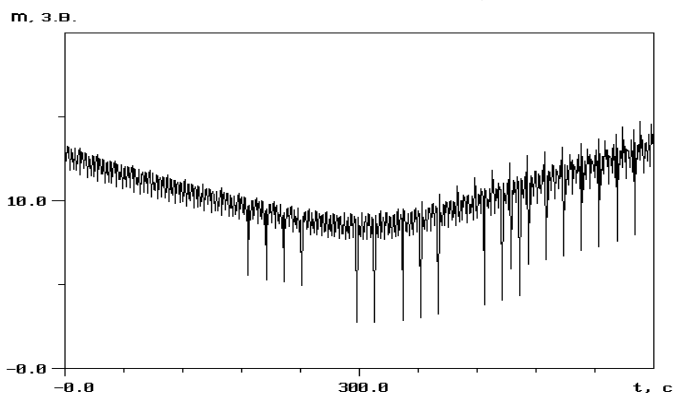
Из рис. 5, а, б видно, что с изменением параметров стабилизации (периода вращения T_0) и ориентации (угла тангажа) ИКО при неизменных параметрах орбиты и условий наблюдения ОЭС **меняется** характер кривой блеска.

Вывод. Использование математической модели в системе мониторинга и контроля космического пространства, на наш взгляд, позволит решать ряд задач, связанных с прогнозированием поведения ИКО на реальном витке относительно оптического наблюдательного средства, расположенного в любой точке Земли, с моделированием нештатных ситуаций на ИКО для их изучения (оценка параметров ориентации и стабилизации, прекращение функциональной активности, изменение отража-

тельных характеристик ИКО, разрушение ИКО вследствие столкновения или взрыва), а также повысить эффективность идентификации ИКО путем сравнения реальных наблюдений с модельными кривыми блеска без предварительного их нормирования.



а)



б)

Рис. 5. Кривые блеска ИКО за время пролета в зоне обнаружения оптико-электронного средства и его изображение на мониторе (стоп-кадр) со следующей информацией: Data 20.01.2002, Time 18:59:55, Sef = = 0.6435 м², Faz = 36.8°, Zv = 9^m.61, Nv = 99, Az = 293.0°, Um = = 25.6°, R = 1236.7 км; а) период вращения T₀ = 7.2 с, угол тангажа 30°; б) период вращения T₀ = 3.6 с, угол тангажа 40°

Вопрос применения модели для идентификации искусственных космических объектов в настоящее время остается открытым, в этом

направлении ведутся активные исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каменев А.А., Мурина Т.А., Нежданова С.Н., Романов В.А. Исследование динамики отражательных характеристик космического мусора в видимом диапазоне спектра с пилотируемых космических аппаратов // *Оптический журнал*. – 1997. – № 10. – С. 101 – 103.
2. Багров А.В., Выгон В.Г., Рыхлова Л.В., Шаргородский В.Д. Исследование состояния аварийного геостационарного спутника по данным фотометрических наблюдений // *Труды международной конференции «Космическая защита Земли – 2000»*. – Евпатория, 2000. – С. 56 – 63.
3. Афанасьев Е.М., Бостынец И.П., Понькин В.А. Оценка оптической заметности объектов сложной формы в атмосфере Земли // *Радиотехника*. – 1998. – № 6. – С. 41 – 43.
4. Дистанционная диагностика характеристик и технического состояния КА с помощью телескопов / Анфимов Н.А., Васильев В.Н., Колюка Ю.Ф. и др. // *Труды конференции «Околоземная астрономия XXI века»*. – Звенигород: РАН ИА, 2001. – С. 14 – 23.
5. *Математическая энциклопедия. Том 1. А – Г / Под ред. В.И. Виноградова*. – М.: Сов. энциклопедия, 1977. – 1108 с.
6. Муртазов А.К. Оптические свойства поверхностей ИКО и техногенных отходов в космосе // *Труды конференции «Околоземная астрономия XXI века»*. – Звенигород: РАН ИА, 2001. – С. 262 – 268.
7. Гуревич М.М. *Фотометрия (теория, методы и приборы)*. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 272 с.
8. Сапожников Р.А. *Теоретическая фотометрия*. – М.: Энергия, 1977. – 264 с.
9. Москвитин С.В. *Теоретические основы оптической локации*. – Х.: МОУ ХВУ, 1992. – 369 с.

Поступила 1.07.2003

РЕЗНИЧЕНКО Александр Михайлович, канд. техн. наук, ст. научн. сотр., начальник управления научного центра при ХВУ. В 1987 году окончил ХВВКИУ РВ. Область научных интересов – оптико-электронные средства контроля космического пространства.

ЯМНИЦКИЙ Валерий Аронич, канд. физ.-мат. наук, ст. научн. сотр., ведущий научный сотрудник научного центра при ХВУ. В 1958 году окончил Харьковский политехнический институт. Области научных интересов – космическая баллистика, управление средствами контроля космического пространства, программные тренажеры для пилотируемой космонавтики.

МИШУРА Игорь Иванович, начальник отделения кафедры Харьковского военного университета. В 1995 году окончил ХВУ. Область научных интересов – оптико-электронные средства контроля космического пространства.