

В. И. Майорова, Н. Н. Ханеня

**МОДЕЛИРОВАНИЕ И ВИЗУАЛИЗАЦИЯ
ОКОЛОЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА
ДЛЯ СОЗДАНИЯ СТЕНДА ПОЛУНАТУРНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ
И СТАБИЛИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО
АППАРАТА ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**

Разработан и программно реализован набор средств для моделирования и визуализации околоземного пространства в целях использования в составе стенда полунатурного моделирования системы ориентации и стабилизации космического аппарата. Разработаны модели звездного неба, Солнца, Луны, Земли, гравитационного и геомагнитного полей. Разработаны удобный пользовательский интерфейс. Создан полнофункциональный прототип стенда.

E-mail: victoria.mayorova@gmail.com;**Nick3.Khanenya@gmail.com**

Ключевые слова: космический аппарат, аппаратно-программный комплекс, система ориентации и стабилизации космического аппарата, звездный прибор, моделирование околоземного пространства.

Большую часть стоимости создания современного космического аппарата (КА) составляет его экспериментальная отработка [1]. На всех этапах разработки КА натурный эксперимент сопровождается численным экспериментом. Преимуществом численного моделирования по сравнению с натурным экспериментом является низкая стоимости и большая универсальность, недостатком — меньшая достоверность. Зачастую эти два вида экспериментальной отработки совмещают, создавая специальные аппаратно-программные комплексы (АПК), подобные стенду полунатурного моделирования (СПМ) системы ориентации и стабилизации (СОС) КА, созданному в Лаборатории перспективных космических технологий МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Состав и принцип работы СПМ СОС КА. Стенд полунатурного моделирования системы ориентации и стабилизации предназначен для моделирования поведения КА на орбите при различных режимах его работы в целях экспериментальной отработки программно-математического обеспечения (ПМО) СОС, а также оборудования, входящего в нее. Принципиальная схема АПК стенда представлена на рис. 1.

В состав АПК входят три вычислительных машины:

- центральная вычислительная система (ЦВС), отвечающая за численное моделирование космического пространства, КА, его движения по орбите и вращения вокруг центра масс;

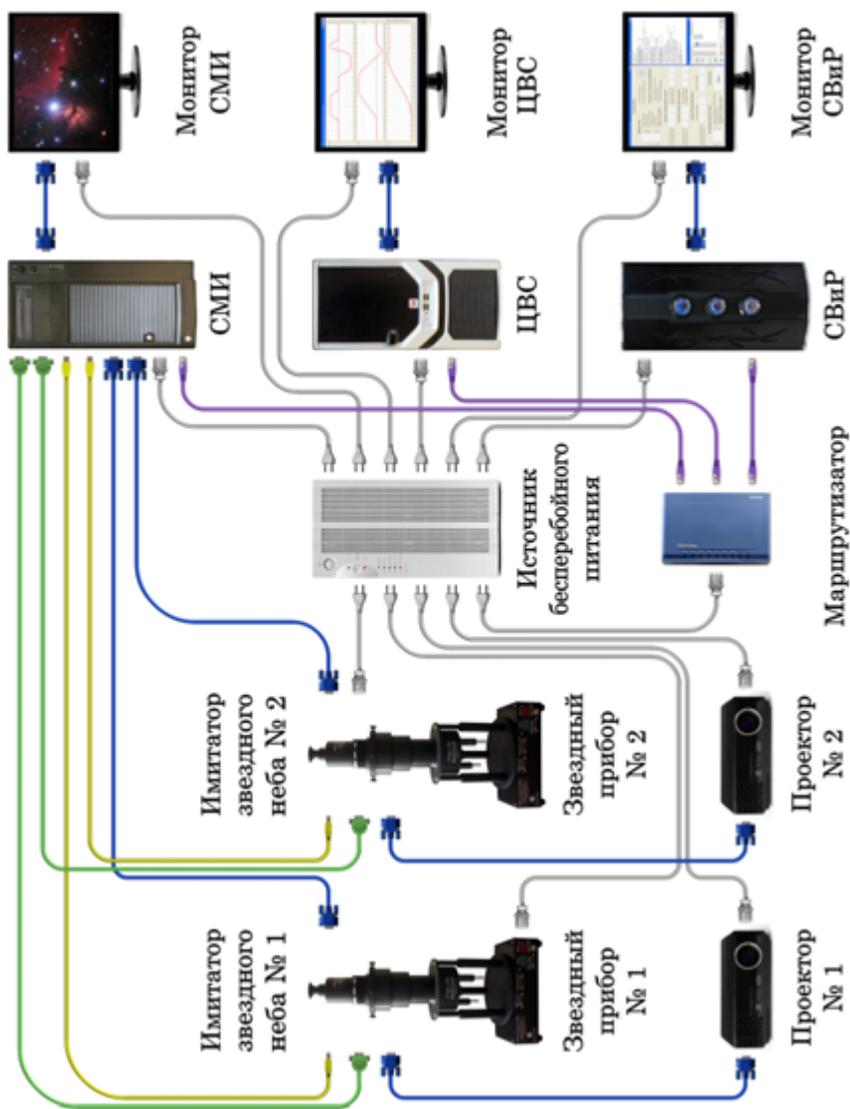


Рис. 1. Принципиальная схема аппаратно-программного комплекса



Рис. 2. Внешний вид звездного прибора “Астрол-12М”

- система моделирования и имитации звездного неба (СМИ), отвечающая за расчет текущего изображения в поле зрения звездных приборов;
- система ввода и регистрации данных (СВиР), отвечающая за взаимодействие АПК с оператором.

Натурной частью АПК являются звездные приборы (ЗП) “Астрол-12М” производства НПО “Лептон”, г. Зеленоград. Внешний вид звездных приборов показан на рис. 2. Все остальные системы КА моделируются численно.

Изображение, поступающее на вход ЗП, формируется имитатором звездного неба (ИЗН) — светодиодным экраном, отображающим участок небосвода, соответствующий текущей ориентации КА. В процессе моделирования движения КА по орбите его ориентация в пространстве меняется с течением времени под действием внешних и внутренних моментов и соответственно смещаются поля зрения ЗП. Вследствие этого изображение на экране ИЗН обновляется, ЗП вновь проводит измерение ориентации, моделируемая СОС фильтрует эти измерения и в зависимости от режима работы выдает команды на моделируемые исполнительные органы, работа которых, в свою очередь, влияет на изменение ориентации КА. Таким образом, организован замкнутый цикл полунатурного моделирования СОС КА.

Средства визуализации. Для того чтобы оператор АПК мог с легкостью контролировать процесс моделирования, СПМ СОС оснащен дружелюбным пользовательским интерфейсом и средствами визуализации. Один из плазменных экранов АПК отображает сферическую панораму космического пространства вокруг моделируемого КА (рис. 3). На небесную сферу нанесены обозначения, перечисленные в табл. 1.

Моделирование Луны и Солнца. Если в ходе моделирования в поле зрения одного из звездных приборов попадает Солнце или Луна,

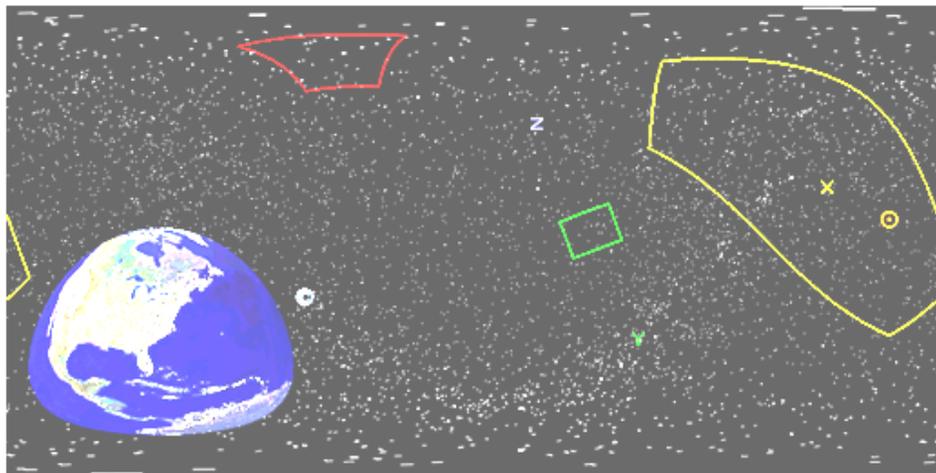


Рис. 3. Пример сферической панорамы космического пространства

показания этого прибора более не считаются действительными, что значительно снижает точность определения ориентации КА. Поэтому для каждого момента времени необходим перерасчет положений Солнца и Луны. Кроме того, расчет положения Солнца необходим для вычисления светового давления на КА, а расчет положения Луны — для учета ее гравитационного воздействия на КА. Авторами разработаны алгоритмы расчета координат светил в прямоугольной экваториальной системе координат для заданного момента времени.

Разработанные алгоритмы расчета положения Луны имеют точность, достаточную для определения момента выключения и включения звездных приборов, а также для оценки светового давления и гравитационного воздействия Луны на КА. В случае необходимости можно заменить эти алгоритмы как для Луны, так и для Солнца более точными и ресурсоемкими [4, 5].

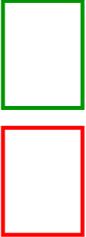
Моделирование Земли. При моделировании любого околоземного космического пространства особенно важно располагать достоверными моделями геогравитационного и геомагнитного полей.

Потенциал поля тяготения Земли определяется ее формой, распределением масс и описывается следующей функцией:

$$V(r; \lambda; \varphi) = \frac{\mu}{r} \left(1 + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{R}{r} \right)^n P_{nm}(\sin \varphi) (c_{nm} \cos(m\lambda) + s_{nm} \sin(m\lambda)) \right),$$

где r — расстояние до центра Земли; λ — долгота; φ — широта; μ — гравитационный параметр; R — экваториальный радиус Земли, $P_{nm}(\sin \varphi)$ — присоединенные функции Лежандра; c_{nm} и s_{nm} — коэффициенты, определяемые экспериментально.

Обозначения на небесной сфере

Обозначение	Описание
	Проекция Земного шара на сферу, окружающую моделируемый КА. На этой проекции видна подстилающая поверхность, по освещенности которой также можно судить о местном времени суток
	Положения Солнца и Луны. Угловые размеры Солнца и Луны составляют около половины углового градуса, что в масштабах всей небесной сферы относительно мало, поэтому для обозначения положения Солнца и Луны по желанию оператора могут быть использованы не их реальные проекции, а условные обозначения
	Точки небесной сферы, в которые направлены оси связанной системы координат КА
	Звезды – до 45269 штук. В качестве исходных данных для построения панорамы звездного неба используется выборка из звездного каталога SKY2000 [3]
	Поля зрения звездных приборов. Их размеры по умолчанию равны 20×15 угловых градусов
	Поле зрения солнечного датчика. По желанию оператора можно также добавить поля зрения других опико-электронных приборов, например камер дистанционного зондирования Земли

Алгоритм расчета значения присоединенной функции Лежандра $P_{nm}(x)$: $A = 1$. Для всех целых $I \in [1, m]$ $A = A(1 - 2I)$; $A = A(1 - x^2)^{\frac{m}{2}}$.

Если $n = m$, то конечным результатом является число A , в противном случае $B = Ax(2m + 1)$.

Для всех целых $I \in [m + 2, n]$

$$C = \frac{Bx(2I - 1) - A(I + m - 1)}{1 - m}; \quad A = B; \quad B = C.$$

Конечным результатом является число B .

В табл. 2 приведены значения (умноженные на 10^{-6} коэффициентов C_{nm} и S_{nm} разложения потенциала земного притяжения в ряд по

сферическим функциям, опубликованные Смитсоновской астрофизической обсерваторией в 1970 г. [6].

Таблица 2

Коэффициенты разложения потенциала земного притяжения

m	0	1	2	3	4	5
c_{2m}	-1082,63	0	2,41	-	-	-
s_{2m}	-	0	-1,36	-	-	-
c_{3m}	2,54	1,97	0,89	0,69	-	-
s_{3m}	-	0,26	-0,63	1,43	-	-
c_{4m}	1,59	-0,53	0,33	0,99	-0,08	-
s_{4m}	-	-0,49	0,71	-0,15	0,34	-
c_{5m}	0,23	-0,05	0,61	-0,43	-0,27	0,13
s_{5m}	-	-0,10	-0,35	-0,09	0,08	-0,06

Из табл. 2 следует, что вторая зональная гармоника, которая определяется наличием у Земли полюсного сжатия, намного больше всех остальных гармоник. Поэтому при исследовании влияния нецентральнойности поля тяготения на орбиту спутника обычно отдельно рассматривают влияние сжатия Земли и влияние аномалий поля тяготения (сумма всех гармоник без второй зональной).

Изменение потенциала поля тяготения вследствие сжатия Земли может быть описано следующим выражением [7]:

$$\Delta V = -\frac{\varepsilon}{3r^3}(3 \sin^2 i \sin^2 u - 1),$$

где $\varepsilon = 2,634 \cdot 10^{10} \text{ км}^5/\text{с}^2$ — константа сжатия.

Величина ΔV — дополнительная потенциальная энергия единичной массы в данной точке поля тяготения.

Радиальная, трансверсальная и бинормальная составляющие соответствующего возмущающего ускорения имеет вид

$$S = \frac{\partial \Delta V}{\partial r} = \frac{\varepsilon}{r^4}(3 \sin^2 i \sin^2 u - 1);$$

$$T = \frac{1}{r} \frac{\partial \Delta V}{\partial u} = -\frac{\varepsilon}{r^4} \sin^2 i \sin 2u;$$

$$W = \frac{1}{r \sin u} \frac{\partial \Delta V}{\partial i} = -\frac{\varepsilon}{r^4} \sin 2i \sin u.$$

Для моделирования СОС, использующих в своем составе электромагнитные катушки, необходимо располагать достоверной моделью геомагнитного поля. Такой моделью для СОС КА является модель “IGRF-11” [8, 9], которая позволяет вычислить магнитное поле Земли

в определенных координатах (с учетом источников поля, которые находятся внутри Земли без учета внешних токов). Модель основана на экспериментальных наблюдениях, проведенных на геомагнитных обсерваториях, кораблях, самолетах и искусственных спутниках Земли.

Выводы. Разработан и программно реализован набор средств для моделирования и визуализации околоземного пространства в целях использования в составе стенда полунатурного моделирования системы ориентации и стабилизации космического аппарата. Получены модели звездного неба, Солнца, Луны, Земли, геогравитационного и геомагнитного полей. Разработан удобный пользовательский интерфейс. Создан полнофункциональный прототип стенда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Экспериментальная отработка космических летательных аппаратов / В.А. Афанасьев, В.С. Барсуков, М.Я. Гофин и др. / Под ред. Н.В. Холодкова. – М.: Изд-во МАИ, 1994. – 412 с.
2. Клищенко А. П., Шупляк В. И. Астрономия: Учеб. пособие. – М.: Новое знание, 2004. – 224 с.
3. SKY2000 Catalog. J.R. Myers, C.B. Sande, A.C. Miller [et al.] // SAO/NASA ADS Astronomy. 2002 [Электронный ресурс]. URL: <http://tdc-www.harvard.edu/catalogs/sky2k.html> (дата обращения: 12.05.2012).
4. Монтенбрук О., Пфлегер Т. Астрономия с персональным компьютером. – М.: Мир, 1993. – 279 с.
5. Даффет-Смит П. Практическая астрономия с калькулятором. – М.: Мир, 1982. – 176 с.
6. Сагитов М. У., Кузиванов В. А. Гравитационное поле Земли // Большая советская энциклопедия [Электронный ресурс]. URL: <http://bse.sci-lib.com/article012664.html> (дата обращения: 12.05.2012).
7. Казаковцев В. П. Теория космического полета / Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – Ч. 2. – 20 с.
8. International Geomagnetic Reference Field // The eleventh generation Geophysical Journal International / C.C. Finlay, S. Maus, C.D. Beggan et al. – 2010. Vol. 183. – P. 1216–1230.
9. Ханеня Н. Н., Майорова В. И. Разработка алгоритма определения ориентации звездного прибора космического аппарата по изображению звездного неба // Изв. вузов. – Спец. вып. – С. 19–26.