

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ПЛАНЕТЫ И СПУТНИКА В КОСМИЧЕСКИХ ВИДЕОТРЕНАЖЕРАХ

М.В. МИХАЙЛЮК<sup>\*</sup>, П.Ю. ТИМОХИН<sup>†</sup>

<sup>\*</sup> Научно-исследовательский институт системных исследований РАН  
Москва, Россия  
e-mail: mix@niisi.ras.ru

<sup>†</sup> Научно-исследовательский институт системных исследований РАН  
Москва, Россия  
Email: webpismo@yahoo.de

**Ключевые слова:** Космический тренажер, планета, подспутниковая трасса, визуализация.

**Аннотация.** Для реализации многих важных имитационных сценариев в космических видео тренажерных комплексах необходимо моделирование взаимного расположения планеты и космического аппарата (КА), соответствующего реальной подспутниковой трассе и расположению средств наблюдения на КА. В статье описан метод вычисления такого расположения, при котором КА является неподвижным, а планета перемещается и меняет ориентацию таким образом, чтобы смоделировать движение КА вдоль подспутниковой трассы.

## SIMULATION OF MUTUAL PLANET-SATELLITE ARRANGEMENT IN SPACE VIDEO SIMULATORS

M.V. MIKHAYLYUK<sup>\*</sup>, P.YU. TIMOKHIN<sup>†</sup>

<sup>\*</sup> Scientific Research Institute for System Analysis of RAS  
Moscow, Russia  
e-mail: mix@niisi.ras.ru

<sup>†</sup> Scientific Research Institute for System Analysis of RAS  
Moscow, Russia  
Email: webpismo@yahoo.de

**Summary.** Implementation of many important training scenarios in space video simulators requires modeling of the mutual planet-satellite arrangement appropriate to a real satellite ground track and location of observation cameras on the spacecraft. The article describes the method of calculation of such arrangement where spacecraft is fixed, and the planet moves and changes its orientation to simulate the motion of the spacecraft along its satellite ground track.

**2010 Mathematics Subject Classification:** 76M27.

**Key words and Phrases:** Space Simulator, Planet, Satellite Track, Visualization.

## 1 ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач современных и перспективных космических видео тренажеров является визуализация имитационных сценариев, связанных с исследованием планеты с околопланетной орбиты с помощью различных средств наблюдения (навигация по подстилающей поверхности, мониторинг глобальных природных явлений, ручное фотографирование заданных участков планеты и др.). В тренажерном комплексе это реализуется с помощью подсистемы моделирования и подсистемы визуализации<sup>1</sup>. В подсистему визуализации предварительно загружается виртуальная сцена, которая содержит трехмерные модели космического аппарата (КА) и планеты, а также ряд виртуальных камер, связанных с КА. За каждой виртуальной камерой закрепляется отдельный канал подсистемы визуализации, синтезирующий изображения для имитируемого средства наблюдения (рис. 1). Подсистема моделирования периодически (например, каждые 40 мс) рассчитывает в некоторой системе координат положение и ориентации динамических объектов и передает их по информационному протоколу через блок синхронизации и распределения в каналы подсистемы визуализации. В каждом канале по полученным данным производится установка трехмерных моделей в виртуальной сцене и синтезируется ее изображение. В процессе реализации тренировки с такой визуализацией повышенное внимание уделяется вычислению взаимного расположения КА и планеты, соответствующего реальной подспутниковой точке и расположению каждой виртуальной камеры на КА в произвольный момент времени. Для решения этой задачи удобно выбрать в качестве основной планетоцентрическую систему координат. Однако во многих тренажерах (например, в тренажерах стыковки) для уменьшения погрешностей вычислений используется система координат, связанная с КА. В связи с этим возникает необходимость разработки методов и алгоритмов решения поставленной задачи в этой системе.

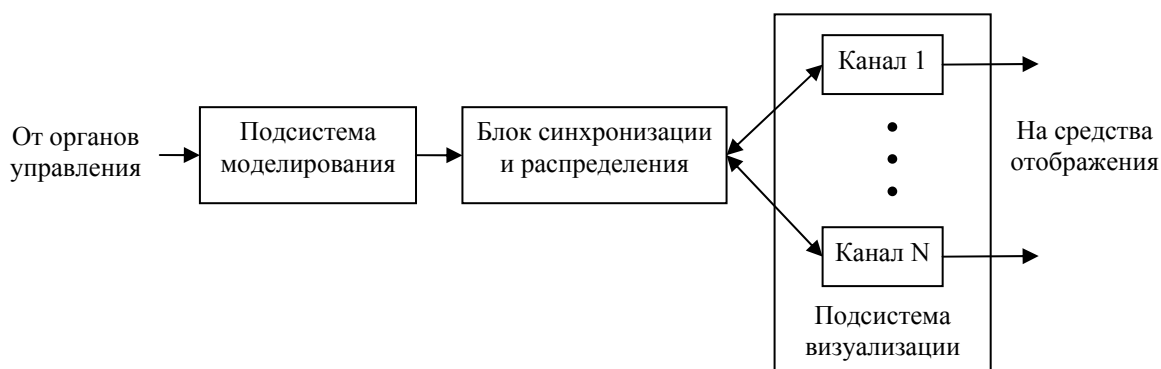


Рис. 1. Схема взаимодействия подсистемы моделирования и подсистемы визуализации в типовом космическом видеотренажерном комплексе

В данной работе предполагается, что КА является неподвижным, а планета перемещается и меняет ориентацию таким образом, чтобы смоделировать движение КА вдоль подспутниковой трассы. Это позволит визуализировать соответствующие участки планеты во всех визуальных каналах. Для вычисления такого положения и ориентации выполняются последовательные переходы через ряд промежуточных

систем координат, при которых координаты модели планеты последовательно преобразуются, исходя из заданных параметров орбиты КА, вращения планеты вокруг своей оси и текущей ориентации КА. В каждом канале подсистемы визуализации полученные параметры положения и ориентации преобразуются в систему координат соответствующей виртуальной камеры. В работе описана последовательность переходов в промежуточные системы координат и определены соответствующие матрицы преобразований координат модели планеты.

## 2 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть имеется планета, вращающаяся вокруг своей оси с постоянной угловой скоростью  $w_{\Pi}$ , и КА, который движется по невозмущенной кеплеровской эллиптической орбите, один из фокусов которой совпадает с центром планеты. Траектория КА задана шестью постоянными независимыми параметрами (элементами кеплеровской траектории) в абсолютной планетоцентрической системе  $E_A$  координат (рис. 2). Это долгота  $\Omega$  восходящего узла, наклонение  $i$  плоскости орбиты к плоскости экватора, аргумент  $\omega$  перигея, эксцентриситет  $e$ , фокальный параметр  $p$ , а также время  $t_x$  прохождения КА через перигей  $\Pi$  орбиты. Виртуальная модель планеты (координаты всех вершин модели) задана в планетоцентрической системе координат  $E_{\Pi}$ . Системы  $E_A$  и  $E_{\Pi}$

являются аналогами абсолютной геоцентрической и геоцентрической систем координат<sup>2</sup>. Совокупность подспутниковых точек на модели планеты, полученная в результате наложения движения КА по орбите и вращения планеты вокруг своей оси (суточного вращения), образует *подспутниковую трассу* КА. Начало трассы первого суточного витка КА задается планетоцентрической долготой  $L_0$ . Модель КА задана в системе  $E_M$  координат,

центр которой совпадает с центром масс КА, а оси направлены в соответствии с расположением строительных осей у реального КА. Каждая виртуальная камера расположена в некоторой своей фиксированной точке КА, но может поворачиваться вокруг своих осей. Ориентация КА задается относительно базовой системы  $E_B$  координат, центр которой совпадает с центром  $E_M$ , а оси первоначально совпадают с осями системы  $E_M$ . Система  $E_B$

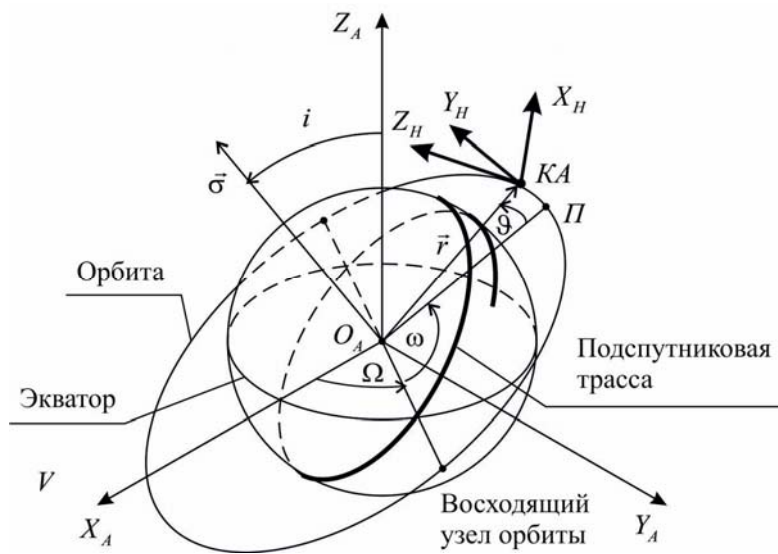


Рис. 2. Элементы кеплеровской траектории

перемещается вместе с КА, все время сохраняя свою ориентацию относительно абсолютной планетоцентрической системы  $E_A$ .

Рассмотрим положение КА в некоторой точке орбиты. В этой точке КА имеет какую-то ориентацию, и виртуальная камера направлена на поверхность планеты. Для получения изображения планеты в виртуальной камере необходимо вычислить координаты любой вершины  $P$  модели планеты в системе  $E_H$  координат наблюдателя (виртуальной камеры). Обозначим через  $P_{\Pi}$  и  $P_H$  координаты  $P$  в системах  $E_{\Pi}$  и  $E_H$ . Тогда задача сводится к вычислению матрицы  $A_{\Pi \rightarrow H}$  перехода от системы координат  $E_{\Pi}$  к системе координат  $E_H$ , так что мы будем иметь  $P_H = A_{\Pi \rightarrow H} P_{\Pi}$ <sup>3</sup>. При этом вычисление  $A_{\Pi \rightarrow H}$  надо производить путем правильного перемещения и ориентации планеты (вместе с ее системой координат  $E_{\Pi}$ ) относительно неподвижного КА.

### 3 ПРЕДЛАГАЕМЫЙ МЕТОД

Определим ряд промежуточных систем координат  $E_A$ ,  $E_{КА}$ ,  $E_B$  и  $E_M$  при переходе от системы  $E_{\Pi}$  к системе  $E_H$ . Преобразование координат точки  $P$  планеты при переходе от одной системы к другой задается с помощью соответствующей матрицы перехода. Рассмотрим более подробно вычисление каждой из этих матриц и вычисление результирующей матрицы  $A_{\Pi \rightarrow H}$ .

**Преобразование из планетоцентрической системы  $E_{\Pi}$  в абсолютную планетоцентрическую систему координат  $E_A$ .** Данное преобразование учитывает вращение планеты вокруг своей оси. Обозначим искомую матрицу через  $A_{\Pi \rightarrow A}$ . У систем  $E_{\Pi}$  и  $E_A$  начала координат и оси  $O_{\Pi}Z_{\Pi}$  и  $O_AZ_A$  совпадают, а угол  $s$  между осями  $O_A X_A$  и  $O_{\Pi} X_{\Pi}$  определяется как (рис. 3)

$$s = \Omega - L_0 + w_{\Pi} \cdot (t + T - t_B),$$

где  $T$  - период обращения КА по орбите<sup>4</sup>, а  $t_B$  - время первого прохождения КА восходящего узла  $B$  орбиты. Для эллиптической орбиты время  $t_B$  можно найти численным приближением истинной аномалии  $\vartheta$  к значению  $2\pi - \omega$  (алгоритм вычисления  $\vartheta$  по параметрам орбиты приведен в<sup>5</sup>). В случае круговой орбиты  $t_B = (2\pi - \omega) \cdot T / 2\pi$ . Поэтому координаты  $P_A$  точки  $P$  модели планеты в системе  $E_A$  находятся как

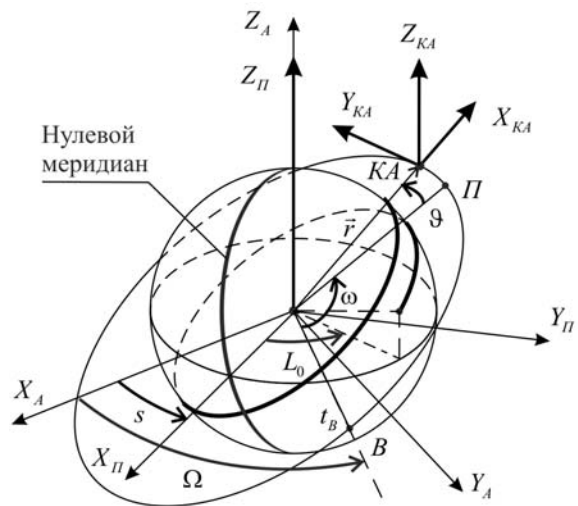


Рис. 3. Вычисление угла  $s$

$$P_A = A_{\Pi \rightarrow A} \cdot P_{\Pi} = R_{Z,s} \cdot P_{\Pi}, \quad (1)$$

где  $R_{Z,s}$  - матрица поворота пространства<sup>3</sup> вокруг оси  $O_{\Pi}Z_{\Pi}$  на угол  $s$ .

**Преобразование из абсолютной планетоцентрической системы  $E_A$  в унифицированную систему  $E_{KA}$  координат КА.** Это преобразование учитывает положение КА на орбите. Обозначим искомую матрицу через  $A_{A \rightarrow KA}$ . У системы  $E_{KA}$  начало координат  $O_{KA}$  располагается в центре масс КА, ось  $O_{KA}X_{KA}$  совпадает по направлению с текущим радиус-вектором  $\vec{r}$ , ось  $O_{KA}Z_{KA}$  перпендикулярна плоскости орбиты, а ось  $O_{KA}Y_{KA}$  дополняет эти оси до правосторонней системы координат (рис. 3). Координаты  $P_{KA}$  точки  $P$  модели планеты в системе  $E_{KA}$  находятся следующим образом<sup>2</sup>:

$$P_{KA} = A_{A \rightarrow KA} \cdot P_A = T_{\vec{d}} \cdot R_{Z,u}^T \cdot R_{X,i}^T \cdot R_{Z,\Omega}^T \cdot P_A, \quad (2)$$

где  $T_{\vec{d}}$  - матрица переноса пространства на вектор  $\vec{d} = (-r, 0, 0, 0)$ , а  $r$  - длина радиус-вектора  $\vec{r}$  (вычисление  $r$  по параметрам орбиты приведено в <sup>4</sup> и <sup>5</sup>);  $R_{Z,u}$  - матрица поворота пространства вокруг оси  $O_{KA}Z_{KA}$  на угол  $u$ , где  $u = \omega + \vartheta$  - аргумент широты КА;  $R_{X,i}$  - матрица поворота пространства вокруг оси  $O_{KA}X_{KA}$  на наклонение  $i$  орбиты;  $R_{Z,\Omega}$  - матрица поворота пространства вокруг оси  $O_{KA}Z_{KA}$  на долготу  $\Omega$  восходящего узла орбиты.

**Преобразование из унифицированной системы  $E_{KA}$  в базовую систему  $E_B$  координат КА.** Это преобразование учитывает ориентацию  $E_{KA}$  относительно базовой системы координат КА. Обозначим искомую матрицу через  $A_{KA \rightarrow B}$ . По определению (см. раздел 2) оси системы  $E_B$  имеют заданную фиксированную ориентацию относительно системы  $E_A$ , а центр  $O_B$  совпадает с центром масс КА. Координаты  $P_B$  точки  $P$  модели планеты в системе  $E_B$  находятся как

$$P_B = R_{A \rightarrow B} \cdot T_{\vec{r}} \cdot P_A, \quad (3)$$

где  $T_{\vec{r}}$  - матрица переноса системы координат  $E_A$  на вектор  $\vec{r}$  (координаты которого заданы в системе  $E_A$ ),  $R_{A \rightarrow B}$  - матрица поворота  $E_A$ , совмещающая ее с системой  $E_B$  ( $R_{A \rightarrow B}$  фиксирована и легко вычислима из начальных условий, т.к. ориентации этих систем координат не меняются при движении КА). Аналогично (3) для координат  $P_{KA}$  имеет место соотношение

$$P_{KA} = R_{A \rightarrow KA} \cdot T_{\vec{r}} \cdot P_A, \quad (4)$$

где  $T_{\vec{r}}$  - та же матрица, что в (3), а  $R_{A \rightarrow KA}$  - матрица поворота, переводящая  $E_A$  в систему  $E_{KA}$ . Из (2) следует, что  $R_{A \rightarrow KA} = R_{Z,u}^T \cdot R_{X,i}^T \cdot R_{Z,\Omega}^T$ . Выразив из (4) координаты  $P_A$  и подставив их в (3) получим

$$P_B = R_{A \rightarrow B} \cdot T_{\vec{r}} \cdot T_{\vec{r}}^{-1} \cdot R_{A \rightarrow KA}^T \cdot P_{KA} = R_{A \rightarrow B} \cdot R_{Z,\Omega} \cdot R_{X,i} \cdot R_{Z,u} \cdot P_{KA}. \quad (5)$$

Отсюда получаем  $A_{KA \rightarrow B} = R_{A \rightarrow B} \cdot R_{Z,\Omega} \cdot R_{X,i} \cdot R_{Z,u}$ .

**Преобразование из базовой системы  $E_B$  в систему координат  $E_M$  модели КА.** Это преобразование учитывает текущую ориентацию системы  $E_M$  космического аппарата относительно базовой системы  $E_B$  координат. Обозначим искомую матрицу через  $A_{B \rightarrow M}$ . Так как центр системы  $E_M$  совпадает с центром системы  $E_B$ , то координаты  $P_M$  точки  $P$  в системе  $E_M$  находятся как

$$P_M = A_{B \rightarrow M} \cdot P_B = R_{M \rightarrow B}^T \cdot P_B, \quad (6)$$

где  $R_{M \rightarrow B}$  - матрица поворота, переводящая систему  $E_M$  в систему  $E_B$  (матрица  $R_{M \rightarrow B}$  вычисляется на каждом шаге моделирования).

**Преобразование из системы  $E_M$  в систему координат  $E_H$  наблюдателя.** Это преобразование учитывает положение и ориентацию виртуальной камеры относительно КА. Обозначим искомую матрицу через  $A_{M \rightarrow H}$ . Как отмечалось выше, виртуальная камера расположена в некоторой фиксированной точке КА, но может поворачиваться вокруг своих осей. Аналогично (3) координаты  $P_H$  точки  $P$  в системе  $E_H$  задаются следующим соотношением:

$$P_H = A_{M \rightarrow H} \cdot P_M = R_{M \rightarrow H} \cdot T_{\vec{f}} \cdot P_M, \quad (7)$$

где  $T_{\vec{f}}$  - матрица переноса пространства на вектор  $\vec{f} = O_H - O_M$ , а  $R_{M \rightarrow H}$  - матрица поворота пространства, переводящего ориентацию системы  $E_M$  в ориентацию системы  $E_H$ . Матрица  $T_{\vec{f}}$  фиксирована и исходно задается при создании виртуальной сцены в системе 3D-моделирования, а матрица  $R_{M \rightarrow H}$  определяется текущей ориентацией камеры.

Перемножив последовательно матрицы  $A_{M \rightarrow H}$ ,  $A_{B \rightarrow M}$ ,  $A_{KA \rightarrow B}$ ,  $A_{A \rightarrow KA}$  и  $A_{P \rightarrow A}$ , вычисленные в (7), (6), (5), (2) и (1), получим искомую матрицу, а именно:

$$A_{P \rightarrow H} = R_{M \rightarrow H} \cdot T_{\vec{f}} \cdot R_{M \rightarrow B}^T \cdot R_{A \rightarrow B} \cdot R_{Z,\Omega} \cdot R_{X,i} \cdot R_{Z,u} \cdot T_{\vec{d}} \cdot R_{Z,u}^T \cdot R_{X,i}^T \cdot R_{Z,\Omega}^T \cdot R_{Z,s}.$$

#### 4 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье предложен метод, позволяющий смоделировать взаимное расположение планеты и КА (соответствующее реальной подспутниковой точке и расположению каждой виртуальной камеры на КА в произвольный момент времени) путем изменения положения и ориентации модели планеты относительно неподвижной системы координат, связанной с КА. В работе описан переход из планетоцентрической системы координат (жестко связанной с планетой) в систему координат наблюдателя (жестко связанную с виртуальной камерой), выполняемый через ряд промежуточных систем координат (абсолютную планетоцентрическую, унифицированную, базовую, систему координат модели КА). Предложенный метод адаптирован для использования в многоканальных подсистемах визуализации современных космических видеотренажерных комплексов. На основе предложенного метода был создан и апробирован программный модуль расчета подспутниковый трассы. Апробация модуля показала адекватность предложенного метода имитационным сценариям, используемым в реальных видео тренажерных комплексах.

#### REFERENCES

- [1] D.V. Putilin, A.A. Gusel'nikov, V.P. Khripunov, Problemy sozdaniya kompleksa trenazherov dlya podgotovki ekipazhey perspektivnoy kosmicheskoy pilotiruемой transportnoy sistemy, *Trudy 10-oy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Pilotiruemye polety v kosmos», Zvezdnyy gorodok*, (2013).
- [2] P.Yu. Timokhin, Modelirovanie poleta kosmicheskogo apparata po okolozemnoy orbite v kosmicheskom trenazhernom komplekse, *J. Programmnye produkty i sistemy*, **4**, 36-41 (2010)
- [3] M.V. Mikhaylyuk, *Osnovy komp'yuternoy grafiki*, MGTU MIREA, M., (2011).
- [4] G.N. Duboshin, *Spravochnoe rukovodstvo po nebesnoy mekhanike i astrodinamike*, M.: Nauka, (1976).
- [5] J. Meeus, *Astronomical algorithms*, Willmann-Bell, (1991).

Поступила в редакцию 12 декабря 2013 года.