

## Моделирование изображений звёздного неба в задачах наземной отработки датчиков ориентации

Г. А. Аванесов, В. А. Шамис, Я. Д. Эльяшев

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*

*E-mail: eluashev-jak@yandex.ru*

Для отработки датчиков звёздной ориентации в оптико-физическом отделе Института космических исследований РАН были созданы две программы моделирования изображений звёздного неба. Программа SkyViewer проецирует изображение звёздного неба на экран стенда динамических испытаний. На этом стенде проводится отработка функционирования всех приборов звёздной ориентации, а также проверка математического аппарата, используемого ими. Программа FrameMaker создаёт кадр звёздного неба, идентичный реальным кадрам, получаемым датчиками звёздной ориентации. Эти кадры позволяют обработать программное обеспечение ещё на стадии проектирования и разработки датчика звёздной ориентации без использования реальных приборов. Обе программы используют одни и те же программные модули. Эти модули отвечают за генерацию орбиты космического аппарата (КА), расчёт трёхосного движения КА, расчёт фотометрических характеристик приборов, проецирование звёздного неба на плоскость фотоприёмного устройства или экран монитора, формирование в этой плоскости изображений звёзд, расчёт аббераций, генерирование посторонних шумов и помех на итоговом изображении, а также сохранение и отображение полученных результатов. В данной статье изложены принципы работы обеих программ, а также рассмотрены основные функции каждого программного модуля.

**Ключевые слова:** датчик звёздной ориентации, звёздное небо, стенд динамических испытаний, орбита спутника, трёхосное движение ИСЗ, фотометрия, проецирование звёздного неба на плоскость, изображение звёзд, абберация, случайные и структурные шумы

Одобрена к печати: 25.02.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-82-94

### Введение

На некоторых этапах наземной отработки звёздных датчиков ориентации возникает необходимость выполнять оценку работы приборов в условиях наблюдения звёзд небесной сферы. Использование для этой цели реального небосвода в лабораторных или производственных условиях крайне затруднительно. На ранних этапах разработки приборов, в 80-е гг. прошлого века, для получения изображений звёзд использовалась профессиональная фотографическая аппаратура. Она вывозилась в районы с хорошим астроклиматом, а полученные с её помощью снимки использовались в качестве слайдов, проецируемых оптическим путём на матричный приёмник излучения. Таким образом, обеспечивалась вполне полноценная отработка приборов в статике. Попытки использования телевизионных мониторов на основе кинескопов для создания динамического имитатора звёздного неба успеха не имели. Достижимая с их помощью точность отображения угловых расстояний между звёздами была недостаточно высокой.

Фактически такое положение дел с воспроизведением реальных угловых расстояний между звёздами в динамике сохранялось неизменным вплоть до появления в конце 1990-х гг. плоских цифровых экранов. Технология их производства обеспечивала строго одинаковые линейные расстояния между пикселями. Соответственно, постоянными оказывались и угловые расстояния между выводимыми на экран изображениями звёзд. Тогда же началась разработка программ для проецирования фрагментов звёздного каталога на цифровой экран в статике, а затем и в динамике. С экрана монитора изображение участков небесной сферы проецировалось через коллиматор и объектив звёздного датчика на матричное фотоприёмное

устройство (МФПУ) прибора. Возможности моделирующей изображения звёзд программы последовательно наращивались. Росла частота смены кадров с изображениями звёзд. К программе подключались новые звёздные каталоги. На экране начала воссоздаваться обстановка, моделирующая воздействие на прибор внешних факторов: паразитных засветок от разных источников, ионизирующего излучения космического пространства, изменения параметров углового движения космического аппарата (КА).

Моделирующая изображения звёзд программа приобрела законченный вид в 2003 г. Она получила название SkyViewer и начала регулярно использоваться при наземной обработке звёздных датчиков ориентации в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) (Аванесов и др., 2003б, 2006, 2009б).

Между тем предметом моделирования постепенно стали сами приборы звёздной ориентации. Для обработки программно-математического обеспечения приборов возникла необходимость генерации больших последовательностей и отдельных кадров изображения участков небесной сферы, сформированных с учётом индивидуальных особенностей звёзд, светооптической обстановки в момент наблюдения, а также всей совокупности параметров самого прибора. Созданная для этих целей программа получила название FrameMaker. Она была введена в эксплуатацию в 2014 г.

Программы SkyViewer и FrameMaker состоят из одних и тех же вычислительных модулей, различающихся только входными данными в зависимости от целей программы.

Программа SkyViewer предназначена для моделирования изображений участков звёздного неба и их отображения на экране стендового монитора в статике или в динамике по требованию оператора. Программа используется для обработки математического обеспечения в составе прибора, а также для оценки его функциональных возможностей в разных условиях эксплуатации. В сегодняшнем виде программа содержит набор из 12 звёздных каталогов. Один из них имеет расширенный список из 41 399 звёзд до 8,5 звёздной величины, выбранных из каталога Hipparcos. Остальные 11 представляют собой каталоги звёзд, набранные из расширенного списка для конкретных звёздных датчиков ориентации, разработанных в ИКИ РАН. Алгоритм программы выводит на экран изображения звёзд в соответствии с выбранным оператором звёздным каталогом и конфигурацией стенда. Кадры, которые прибор получает на этом стенде, практически полностью идентичны реальным кадрам с неба. Программа также имеет возможность имитации линейного и углового движения космического аппарата по орбите, а также шумов и помех различной физической природы, проявляющихся в процессе съёмки и влияющих на результат. Одна из основных особенностей работы программы — высокая частота обновления информации (до 100 Гц), что позволяет проверять работоспособность приборов на больших угловых скоростях КА и при любых конфигурациях установки прибора.

Программа FrameMaker предназначена для формирования массивов данных, сохраняемых в памяти компьютера и используемых затем при испытаниях и отладке программного обеспечения различных типов звёздных датчиков без применения реальных приборов. Так как обработка генерируемой программой FrameMaker информации непосредственно не связана с функционированием прибора, высокая частота работы от неё не требуется. Программа генерирует кадры, практически неотличимые от снимков, получаемых реальными приборами в процессе эксплуатации. Сформированные в программе кадры затем используются для обработки программного обеспечения приборов. Сравнение полученных при этом результатов с заложенными в программе FrameMaker исходными данными позволяет находить и исправлять большинство ошибок программного обеспечения прибора.

Основные принципы работы обеих программ заключаются в следующем. Для каждого заданного момента времени генерируются координаты КА на орбите и положение его системы координат (СК) по отношению к звёздам небесной сферы, а также координаты на ней визирной оси звёздного датчика ориентации. По координатам визирной оси определяется центр наблюдаемой звёздным датчиком в данный момент площадки на небе. Угловые размеры площадки определяются полем зрения прибора. Таким образом, создаётся адресная система для выборки групп звёзд из каталога Hipparcos.

В программе SkyViewer изображение звёзд участка небесной сферы формируется с учётом их звёздной величины, годичной и спутниковой абберации, а также прецессии и нутации земной оси. На изображение звёзд накладываются шумы и помехи, после чего изображение выводится на экран монитора. Звёзды на экране монитора отображаются одним пикселем, угловой размер которого определяет величину пространственной дискретизации изображения. Затем «бортовое» время увеличивается на  $dt$ , и весь цикл повторяется. Таким образом, изображение участка небесной сферы предъявляется прибору дискретно по пространству и по времени. При этом генерация изображений и работа исследуемого прибора никак не синхронизированы друг с другом. Выдерживается лишь одно условие: частота выводимых на экран монитора кадров изображения должна быть не менее чем в два раза выше, чем частота съёмки в приборе. Пространственная и временная дискретизация изображения ограничивает возможности использования рассматриваемого способа моделирования для оценки точности координатных измерений, выполняемых испытываемым прибором, но никак не мешает обработке его математического обеспечения и оценке функциональных возможностей.

Программа FrameMaker отличается от программы SkyViewer тем, что цифровые изображения выбранной группы звёзд математическим путём проецируются из каталога непосредственно на МФПУ прибора с учётом передаточной функции его объектива. На изображения звёзд накладываются шумы и помехи. Итоговый кадр сохраняется на жёстком диске. Затем «бортовое» время увеличивается на  $dt$ , и весь цикл повторяется. Здесь также присутствует пространственная и временная дискретизация изображения, но её параметры полностью определяются характеристиками самого прибора.

Перечень и назначение основных модулей программ SkyViewer и FrameMaker приведён в табл. 1.

Таблица 1. Перечень и назначение основных программ SkyViewer и FrameMaker

	SkyViewer Программа реального масштаба времени	FrameMaker Программа произвольного масштаба времени
Назначение программы	Моделирование последовательностей кадров для вывода на экран стендового монитора	Моделирование последовательностей кадров для обработки программного обеспечения приборов
Программные модули		
1. Построение интерактивной модели орбиты КА	Форма орбиты и положение на ней КА задаётся кеплеровскими элементами орбиты	
2. Расчёт параметров трёхосного вращения КА	Ускорение трёхосного вращения задаётся таблично для каждого момента времени	
3. Расчёт фотометрических характеристик	Только с учётом звёздной величины	С учётом фотометрических и спектральных характеристик звёзд, объектива и МФПУ
4. Проецирование звёзд	На экран стенда	На МФПУ прибора
5. Формирование изображений звёзд	В виде точки на экране стенда	В виде гауссоиды, рассчитанной с учётом ФРТ системы «объектив – МФПУ»
6. Расчёт аббераций	Годичной и спутниковой, прецессии и нутации, оптических аббераций коллиматора	Годичной и спутниковой, прецессии и нутации, оптических аббераций объектива
7. Генерирование шумов и помех на изображении	Фотонный шум, протонные трески, градиентная засветка	Фотонный шум, протонные трески, градиентная засветка, дефекты МФПУ, случайные и структурные шумы МФПУ, виньетирование объектива
8. Сохранение и отображение результатов	Не сохраняются, отображаются в статусном окне и на экране стенда	Сохраняются на жёсткий диск и отображаются в статусном окне

Примечание: ФРТ — функция рассеяния точки.

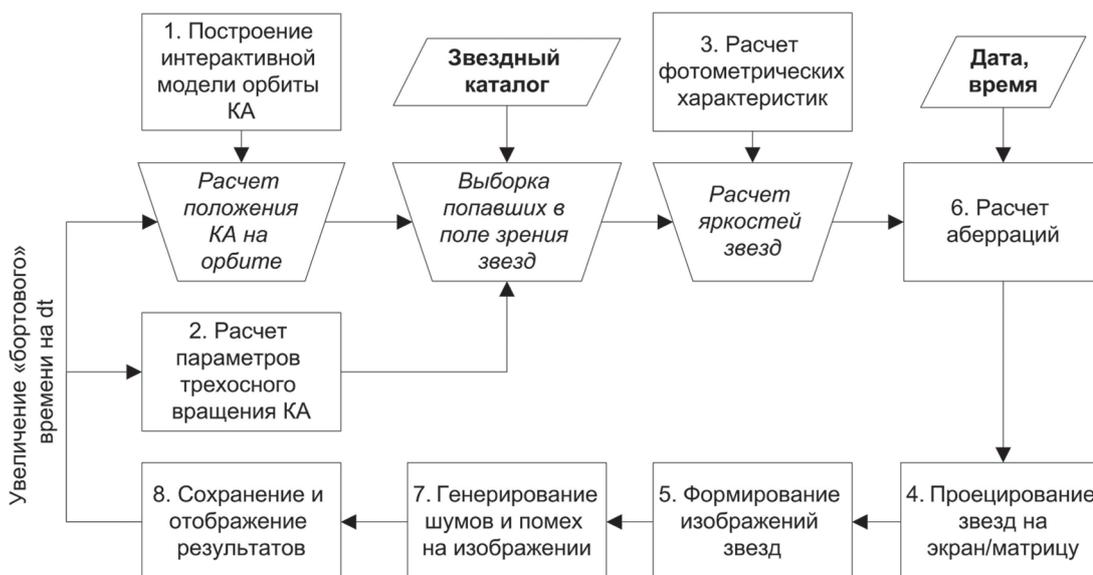


Рис. 1. Обобщённая схема работы программ SkyViewer и FrameMaker

В виде блок-схемы работа обеих программ представлена на рис. 1. Цифрами в блок-схеме обозначены модули, указанные в табл. 1. Эти же номера соответствуют подразделам, в которых дано их подробное описание.

## 1. Построение интерактивной модели орбиты КА

Одна из основных функций программ SkyViewer и FrameMaker заключается в моделировании движения КА по орбите. Для этого в программах реализован модуль интерактивного моделирования орбиты КА. В этом модуле по заданным параметрам генерируется орбита спутника и его начальное положение на этой орбите, а при запуске программы происходит вычисление движения КА по орбите с заданным дискретом по времени (рис. 2).

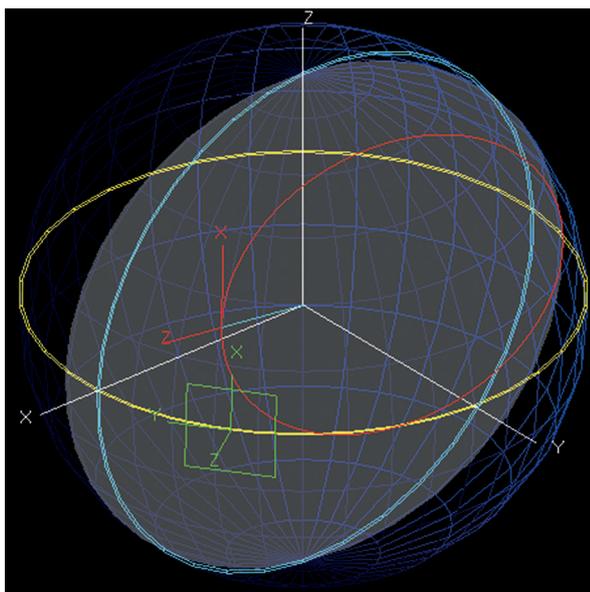


Рис. 2. Интерфейс отображения орбиты КА. Жёлтая и голубая дуги — экватор и первый меридиан; белые оси координат соответствуют инерциальной СК, красные — спутниковой, зелёные — приборной. Полупрозрачная плоскость — плоскость орбиты, красный эллипс — форма орбиты

Положение эллиптической орбиты в инерциальной системе координат задаётся кеплеровскими элементами орбиты, где  $E$  — эксцентриситет;  $A$  — большая полуось;  $\Omega$  — долгота восходящего узла;  $I$  — наклонение к плоскости эклиптики;  $\omega$  — аргумент перицентра;  $M_0$  — средняя аномалия.

Интерфейс программ позволяет задать все параметры орбиты КА, включая текущее положение КА на этой орбите. Элементы орбиты можно задать как графически, передвигая орбиту с помощью мышки, так и численно в таблице параметров.

## 2. Расчёт параметров трёхосного вращения КА

Для полного моделирования движения КА по орбите необходимо задать его угловое движение. По умолчанию устанавливается, что на любой заданной орбите КА находится в орбитальной ориентации. Это значит, что одна из осей КА постоянно ориентирована на центр Земли. Также по умолчанию система координат прибора совпадает с системой координат КА. Это можно изменить, задав необходимую матрицу установки прибора. Вращение в инерциальной системе координат (ИСК) задаётся следующими уравнениями.

Расчёт матрицы ориентации КА в ИСК:

$$\begin{aligned} OriM_{11} &= \cos(\Omega) \cdot \cos(\omega) - \sin(\Omega) \cdot \sin(\omega) \cdot \cos(i); \\ OriM_{12} &= -\sin(\Omega) \cdot \cos(\omega) - \cos(\Omega) \cdot \sin(\omega) \cdot \cos(i); \\ OriM_{13} &= \sin(\omega) \cdot \sin(i); \\ OriM_{21} &= \cos(\Omega) \cdot \sin(\omega) + \sin(\Omega) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(i); \\ OriM_{22} &= -\sin(\Omega) \cdot \sin(\omega) + \cos(\Omega) \cdot \cos(\omega) \cdot \cos(i); \\ OriM_{23} &= -\cos(\omega) \cdot \sin(i); \\ OriM_{31} &= \sin(\Omega) \cdot \sin(i); \\ OriM_{32} &= \cos(\Omega) \cdot \sin(i); \\ OriM_{33} &= \cos(i). \end{aligned}$$

Расчёт вектора угловой скорости вращения КА:

$$\begin{aligned} \omega_x &= OriM_{11} \cdot \sin(\omega) \cdot \sin(i) - OriM_{12} \cdot \cos(\omega) \cdot \sin(i) + OriM_{13} \cdot \cos(i); \\ \omega_y &= OriM_{21} \cdot \sin(\omega) \cdot \sin(i) - OriM_{22} \cdot \cos(\omega) \cdot \sin(i) + OriM_{23} \cdot \cos(i); \\ \omega_z &= OriM_{31} \cdot \sin(\omega) \cdot \sin(i) - OriM_{32} \cdot \cos(\omega) \cdot \sin(i) + OriM_{33} \cdot \cos(i). \end{aligned}$$

Вращение аппарата задаётся циклограммой угловых ускорений, в которой можно для любого промежутка времени задать требуемые значения (рис. 3). Изменение скорости вращения за время  $dt$ :

$$\begin{aligned} \alpha_x &= \omega_x + a_x \cdot dt; \\ \alpha_y &= \omega_y + a_y \cdot dt; \\ \alpha_z &= \omega_z + a_z \cdot dt; \\ \beta &= \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}; \\ \delta_x &= -\alpha_x / \beta; \\ \delta_y &= -\alpha_y / \beta; \\ \delta_z &= -\alpha_z / \beta. \end{aligned}$$

**Циклограмма ускорений вращения КА**

frames	time, c	ax, "/c2	ay, "/c2	az, "/c2
500	5	0	0	0
1500	10	20	0	0
2500	10	-20	0	0
3000	5	0	0	10
3500	5	0	0	-10

Рис. 3. Интерфейс установки циклограммы вращения КА

Расчёт матрицы вращения  $RotM$ :

$$\begin{aligned}
 RotM_{11} &= \cos(\beta) + (1 - \cos(\beta)) \delta_x \delta_x; \\
 RotM_{12} &= (1 - \cos(\beta)) \delta_x \delta_y - \sin(\beta) \cdot \delta_z; \\
 RotM_{13} &= (1 - \cos(\beta)) \delta_x \delta_z + \sin(\beta) \cdot \delta_y; \\
 RotM_{21} &= (1 - \cos(\beta)) \delta_y \delta_x + \sin(\beta) \cdot \delta_z; \\
 RotM_{22} &= \cos(\beta) + (1 - \cos(\beta)) \delta_y \delta_y; \\
 RotM_{23} &= (1 - \cos(\beta)) \delta_y \delta_z - \sin(\beta) \cdot \delta_x; \\
 RotM_{31} &= (1 - \cos(\beta)) \delta_z \delta_x - \sin(\beta) \cdot \delta_y; \\
 RotM_{32} &= (1 - \cos(\beta)) \delta_z \delta_y + \sin(\beta) \cdot \delta_x; \\
 RotM_{33} &= \cos(\beta) + (1 - \cos(\beta)) \delta_z \delta_z.
 \end{aligned}$$

Обновление матрицы ориентации за счёт вращения КА реализует произведение  $OriM \cdot RotM$ .

В итоге программа моделирует полное движение КА на орбите. После запуска программа рассчитывает последовательные положения и ориентацию КА с заданным шагом по времени  $dt$ . Основным результатом этого расчёта становится матрица ориентации прибора ( $OriM$ ), установленного на КА. По этой матрице производится отбор звёзд из каталога Hipparcos, которые попадают в поле зрения прибора в заданный момент времени.

### 3. Расчёт фотометрических характеристик

Для отображения звёзд на экране монитора или на МФПУ прибора в программах SkyViewer и FrameMaker проводится расчёт интегральной яркости звезды (рис. 4).

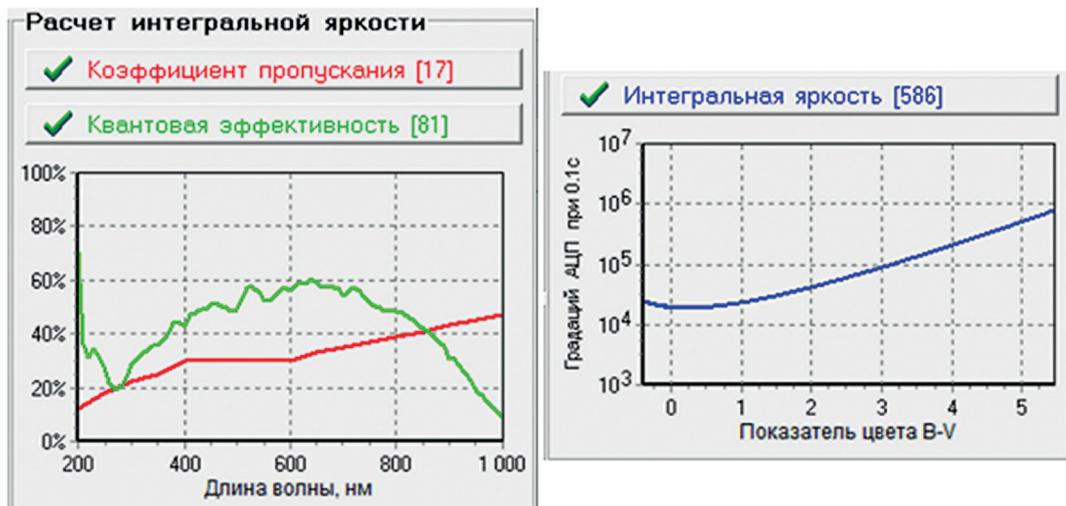


Рис. 4. Визуальное отображение спектральных характеристик объектива и МФПУ (слева) и расчётной интегральной яркости звезды  $\theta_m$  в зависимости от её спектрального класса (справа) в программе FrameMaker

В программе SkyViewer для вычисления интегральной яркости звезды используется только информация о звёздной величине каждой звезды. По умолчанию самая яркая звезда имеет максимальную яркость на мониторе. Яркость остальных звёзд рассчитывается по их звёздным величинам. Соотношения расчётных значений интегральной яркости звёзд и их отображений на мониторе стенда задаются таблично по результатам фотометрической калибровки экрана.

В программе FrameMaker интегральная яркость звёзд рассчитывается в соответствии с их спектральным классом и спектральными характеристиками системы «объектив–МФПУ» прибора. В процессе расчёта используются основные параметры:  $h$  — постоянная Планка;  $k$  — постоянная Больцмана;  $c$  — скорость света;  $\lambda$  — длина волны;  $T$  — температура звезды (рассчитывается по показателю цвета  $B-V$ );  $E_0(\lambda, T)$  — спектральная плотность освещённости от звезды величиной  $m = 0$ ;  $\eta(\lambda)$  — спектральная квантовая эффективность МФПУ;  $\tau(\lambda)$  — интегральный коэффициент пропускания оптической системы;  $D$  — диаметр объектива;  $t$  — время накопления сигнала;  $Q_0$  — интегральный сигнал в электронах от звезды величиной  $m = 0$  за единицу времени;  $Q_m$  — интегральный сигнал в электронах от звезды величиной  $m$ .

Расчёт яркости производится по следующим формулам:

$$E_0(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1}, \quad Q_0 = \frac{\pi}{4} D^2 t \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \tau(\lambda) \eta(\lambda) E_0(\lambda, T) d\lambda, \quad Q_m = \frac{Q_0}{2,512^m}.$$

В программе SkyViewer по умолчанию используется только последнее уравнение.

#### 4. Проецирование звёзд на экран монитора или МФПУ прибора

По полученной в ходе расчёта движения аппарата матрице ориентации каждая попавшая в поле зрения звезда проецируется на экран монитора в программе SkyViewer и на МФПУ прибора в программе FrameMaker. Для этого используются уравнения коллинеарности:

$$x_c = x_0 - f \frac{OriM_{11} \cdot l + OriM_{12} \cdot m + OriM_{13} \cdot n}{OriM_{31} \cdot l + OriM_{32} \cdot m + OriM_{33} \cdot n},$$

$$y_c = y_0 - f \frac{OriM_{21} \cdot l + OriM_{22} \cdot m + OriM_{23} \cdot n}{OriM_{31} \cdot l + OriM_{32} \cdot m + OriM_{33} \cdot n},$$

где  $x_0, y_0, f$  — элементы внутреннего ориентирования;  $l, m, n$  — направляющие косинусы.

В программе SkyViewer в качестве фокусного расстояния  $f$  выступает эквивалентное фокусное расстояние системы «коллиматор – прибор». В программе FrameMaker  $f$  — фокусное расстояние прибора.

Следует учитывать, что полученные координаты проецирования могут быть искажены за счёт аберраций. Природа аберраций может быть самая различная: начиная от геометрических искажений в оптическом тракте прибора, заканчивая астрономическими аберрациями, вызванными движением Земли вокруг Солнца. Большую часть аберраций можно учесть при создании кадра (разд. 6).

#### 5. Формирование изображений звёзд

В программе SkyViewer звёзды отображаются на экране в виде точки, координата которой рассчитана в ходе проецирования звезды на плоскость экрана (разд. 4 и 6), а яркость рассчитывается по звёздной величине звезды (разд. 3).

Программа FrameMaker формирует изображения звёзд в соответствии с функцией рассеяния точки этого прибора. В первом приближении ФРТ прибора можно представить в виде двумерного распределения Гаусса. Нормальное распределение двумерной функции плотности вероятности  $f(x, y)$ , совпадающей с функцией Гаусса, задаётся следующими параметрами:

$$f(x, y) = Q_m \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - x_c}{\sigma}\right)^2\right] \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y - y_c}{\sigma}\right)^2\right],$$

где  $x, y$  — координаты текущего элемента распределения;  $x_c, y_c$  — среднее значение распределения;  $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение (СКО) распределения;  $Q_m$  — интегральное значение яркости.

Яркость в пикселе  $(i, j)$  представляет собой интеграл  $f(x, y)$  внутри этого пикселя:

$$f(i, j) = \int_{i-1}^i \int_{j-1}^j f(x, y) dx dy.$$

В программе этот интеграл рассчитывается методом трапеций.

Y\X	168	169	170	171	172	173	174
92	0	0	1	2	2	1	0
93	0	3	14	31	27	9	1
94	1	13	71	153	131	45	6
95	2	26	139	300	257	88	12
96	1	20	109	235	202	69	9
97	0	6	34	73	63	22	3
98	0	1	4	9	8	3	0

Рис. 5. Интерфейс цифрового отображения распределения яркости звезды на кадре в системе координат МФПУ

В результате каждая звезда отображается на кадре в виде некоторого распределения яркости по пикселям (рис. 5).

## 6. Расчёт аббераций

Существует множество причин, по которым координаты звёзд на МФПУ могут отличаться от результатов идеального проецирования, приведённого в разд. 4. Такие отличия координат вызваны абберациями.

Абберации, моделируемые в программах SkyViewer и FrameMaker:

*Дисторсия* — абберация оптической системы, при которой коэффициент линейного увеличения изменяется по мере удаления отображаемого объекта от оптической оси.

*Годичная абберация* — связана с движением Земли вокруг Солнца.

*Спутниковая абберация* — обусловлена движением спутника вокруг Земли.

*Прецессия* — изменение направления оси вращения Земли, которое влечёт за собой изменение положения звёзд относительно экваториальной системы координат.

*Нутация* — небольшие колебания земной оси, накладывающиеся на прецессионное движение Земли.

<input checked="" type="checkbox"/> Годичная абберация			
<input checked="" type="checkbox"/> Спутниковая абберация			
<input type="checkbox"/> Прецессия и нутация			
<input checked="" type="checkbox"/> Коэффициенты дисторсии [10]			
Ax[0]	3.55731070E-4	By[0]	-2.55150512E-3
Ax[1]	-3.49859490E-4	By[1]	1.47033160E-4
Ax[2]	-4.82498540E-5	By[2]	-2.98887870E-4
Ax[3]	-1.01548670E-4	By[3]	-3.30758660E-6
Ax[4]	3.13643790E-4	By[4]	-1.56863660E-4
Ax[5]	5.73017320E-5	By[5]	3.00879520E-4
Ax[6]	1.10740730E-5	By[6]	-8.41229580E-7
Ax[7]	-1.94710580E-6	By[7]	1.48302110E-5
Ax[8]	1.49410740E-5	By[8]	5.01564630E-7
Ax[9]	-1.89795110E-6	By[9]	1.36636910E-5

Рис. 6. Интерфейс учёта аббераций.  $Ax_j, By_j$  — коэффициенты полиномов коррекции дисторсии

Большую часть aberrаций можно учесть в процессе моделирования кадра (рис. 6, см. с. 89). Зная дату, можно учесть годичную aberrацию, по положению спутника на орбите учитывается спутниковая aberrация. По заданной дате и времени по известным из астрономических ежегодников формулам рассчитывается прецессия и нутация. Коэффициенты оптической дисторсии обычно измеряются в процессе калибровки каждого прибора.

Чаще всего для приборов используется формула обобщённой дисторсии третьего порядка, включающая по 10 коэффициентов для каждой из координат  $x$  и  $y$ :

$$\Delta x = Ax_0 + Ax_1x + Ax_2y + Ax_3x^2 + Ax_4xy + Ax_5y^2 + Ax_6x^3 + Ax_7x^2y + Ax_8xy^2 + Ax_9y^3,$$

$$\Delta y = By_0 + By_1x + By_2y + By_3x^2 + By_4xy + By_5y^2 + By_6x^3 + By_7x^2y + By_8xy^2 + By_9y^3,$$

где  $x, y$  — координаты без учёта дисторсии;  $\Delta x, \Delta y$  — поправки на дисторсию.

Координаты энергетического центра локализованного объекта с учётом дисторсии вычисляются по формулам:

$$x_c = x - \Delta x, \quad y_c = y - \Delta y.$$

При этом в программе SkyViewer учитывается дисторсия коллиматора стенда, а в FrameMaker — дисторсия объектива прибора.

## 7. Генерирование шумов и помех на изображении

Помимо сигнала от самой звезды, в пикселе может оказаться ещё множество шумовых сигналов, которые носят как случайный, так и структурный характер. Часть из них появляется в самом приборе, поэтому в программе SkyViewer они не моделируются. В программе FrameMaker моделируются все указанные в табл. 2 виды шумов и помех.

Таблица 2. Шумы и помехи, моделируемые в программах SkyViewer и FrameMaker

	SkyViewer	FrameMaker
Собственные шумы прибора	—	+
Градиентная засветка	+	+
Протонные треки	+	+
Дефектные пиксели	—	+
Виньетирование	—	+

Случайные помехи складываются из собственных шумов прибора, обусловленных его техническими характеристиками, и фотонного шума, равного квадратному корню из числа фотоэлектронов, сгенерированных в пикселе.

Интегральная яркость звезды распределяется по Гауссу, каждому пикселю кадра соответствует значение яркости  $q_{xy}$  в градациях АЦП (аналого-цифровой преобразователь):

$$I'_{\text{АЦП}_{xy}} = q_{xy} + I_{\text{light}_x},$$

где  $I'_{\text{АЦП}_{xy}}$  — значение пикселя без учёта шума в градациях АЦП;  $I_{\text{light}_x}$  — уровень засветки кадра в градациях АЦП.

Расчёт СКО фотонного шума  $\sigma_{\text{ф}_{xy}}$  (электроны):

$$\sigma_{\text{ф}_{xy}} = \sqrt{I'_{\text{АЦП}_{xy}} K_{\text{АЦП}}},$$

где  $K_{\text{АЦП}}$  — коэффициент перехода АЦП → фотоэлектроны.

Расчёт СКО темнового сигнала  $\sigma_{\text{т}}$ , электроны:

$$\sigma_T = \tilde{\sigma}_T K_{\text{АЦП}},$$

где  $\tilde{\sigma}_T$  — СКО темнового сигнала в градациях АЦП.

Результат с учётом СКО:

$$I_{\text{АЦП}_{xy}} = I'_{\text{АЦП}_{xy}} + I_{\text{dark}} + \frac{1}{K_{\text{АЦП}}} \cdot \text{NOISE} \cdot \sqrt{\sigma_T^2 + \sigma_{\Phi_{xy}}^2},$$

где  $I_{\text{АЦП}_{xy}}$  — значение пикселя с учётом шума в градациях АЦП;  $I_{\text{dark}}$  — средний уровень темнового сигнала в градациях АЦП.

Градиентная засветка может быть вызвана двумя факторами: неравномерностью фона из-за засветки солнцем и техническими особенностями МФПУ. В программе моделируются технические особенности МФПУ, и наложение градиента производится слева направо в зависимости от значений интервала яркости засветки  $B_{\text{left}}$  и  $B_{\text{right}}$ :

$$I_{\text{light}_x} = B_{\text{left}} + \frac{(B_{\text{right}} - B_{\text{left}})X}{X_{\text{width}}},$$

где  $X_{\text{width}}$  — число столбцов МФПУ;  $X$  — текущий номер столбца МФПУ.

Протонные треки образуются при попадании заряженной частицы (чаще всего протона) на МФПУ. Пролетающий через фоточувствительную область протон оставляет за собой ионизационный след, который воспринимается МФПУ как свет. В качестве основы для моделирования протонных событий используются экспериментальные данные, полученные в космических полётах и при испытаниях приборов на протонных ускорителях (Аванесов и др., 2003а, 2009а). Длина и расположение треков в программе задаются случайными величинами в зависимости от табличной функции энергии потока протонов  $f(w)$ :

$$X_{\text{start}} = \text{random}(X_{\text{width}}), Y_{\text{start}} = \text{random}(Y_{\text{height}}),$$

$$X_{\text{end}} = X_{\text{start}} + T_{\text{length}} \cdot \cos(T_{\text{alpha}}), Y_{\text{end}} = Y_{\text{start}} + T_{\text{length}} \cdot \sin(T_{\text{alpha}}),$$

где  $T_{\text{alpha}}$  — угол рассеяния  $[0, 15, \dots, 345]$ ;  $T_{\text{length}}$  — длина трека,  $f(w)$ ;  $X_{\text{width}}$ ,  $Y_{\text{height}}$  — размеры МФПУ (ширина, высота);  $X_{\text{start}}$ ,  $Y_{\text{start}}$  — случайные координаты начала трека;  $X_{\text{end}}$ ,  $Y_{\text{end}}$  — относительные координаты конца трека.

Дефектные пиксели образуются при повреждении отдельных пикселей высокоэнергетическими частицами либо же оказываются дефектами при производстве МФПУ. Случайные координаты дефектных элементов МФПУ, определённые при запуске программы, остаются неизменными при смене кадра:

$$f(x, y) = B_{\text{min}} + \text{random}(B_{\text{max}} - B_{\text{min}}),$$

где  $B_{\text{min}}$ ,  $B_{\text{max}}$  — интервал яркости дефектов;  $x, y$  — координаты дефектов.

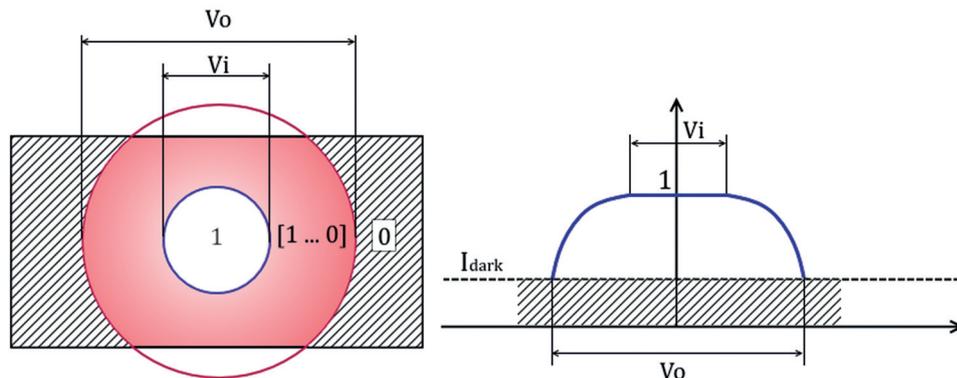


Рис. 7. Форма функции виньетирования

*Виньетирование* — ослабление проходящего под углом по отношению к оптической оси потока лучей в оптической системе. Приводит к постепенному падению яркости изображения звёзд от центра к краям, что особенно заметно по углам кадра.

Для каждой точки кадра с координатой  $(x, y)$  рассчитываются коэффициенты виньетирования. Убывание коэффициентов происходит по параболе от 1 до 0 (рис. 7, см. с. 91):

$$A = -\frac{1}{(R_{out} - R_{in})^2}, \quad B = \frac{2}{R_{out} - R_{in}}, \quad K_{xy} = A(R_{out} - R_{xy})^2 + B(R_{out} - R_{xy}),$$

где  $A, B$  — коэффициенты квадратичной функции;  $R_{in}$  — радиус внутренней области;  $R_{out}$  — радиус внешней области;  $K_{xy}$  — текущее значение коэффициента виньетирования;  $R_{xy}$  — текущее значение радиуса точки кадра.

## 8. Сохранение и отображение результатов

В программе SkyViewer сгенерированное изображение сразу транслируется на монитор. Большинство математических операций в программе упрощено без ущерба для конечного результата, что было актуально в начале XXI в. из-за того, что расчёты проводились на относительно слабых персональных компьютерах. Даже при их использовании частота смены кадров ограничена только частотой обновления монитора. В используемом варианте программы частоту обновления кадров можно задать в диапазоне от 1 до 100 кадров в секунду. В процессе работы в статусное окно выводятся текущие координаты КА на орбите, его ориентация и скорость вращения. Также отображаются номер кадра с момента запуска программы и текущее число отображаемых на кадре звёзд (рис. 8).

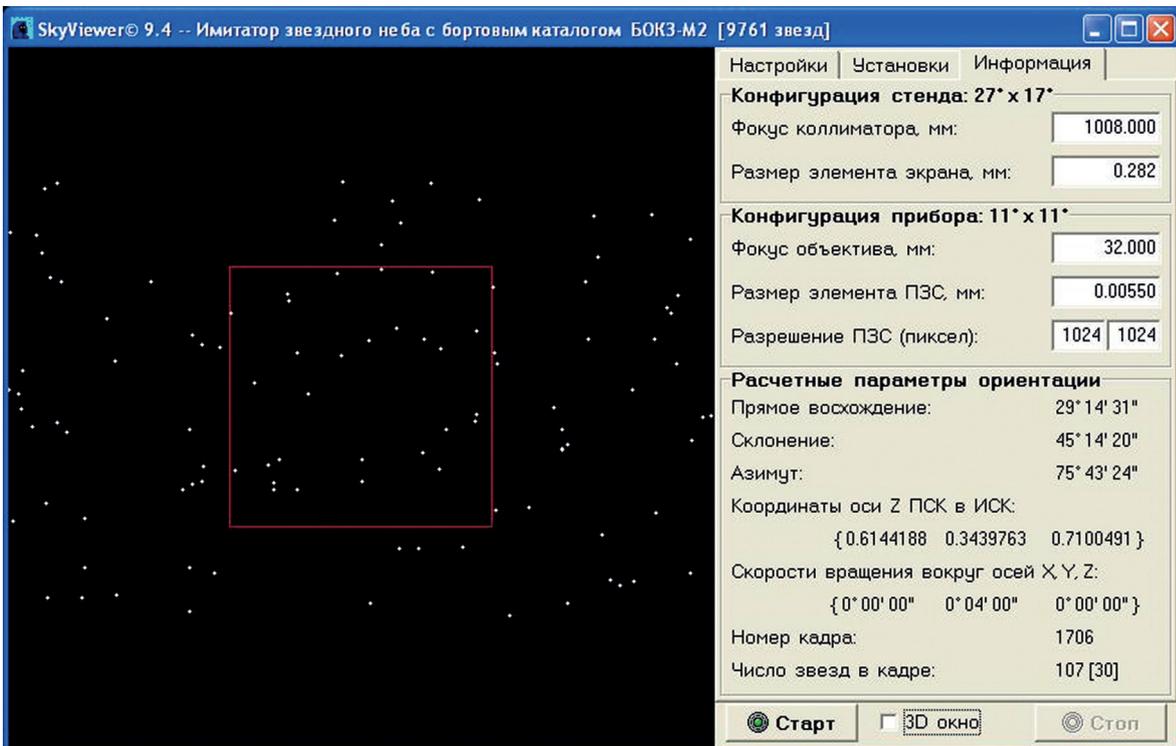


Рис. 8. Интерфейс для контроля работы программы SkyViewer, отображающий основные параметры

В программе FrameMaker сгенерированные изображения сохраняются на жёсткий диск. Программа не предназначена для работы в реальном времени, поэтому для построения изображения берутся более точные формулы и учитывается большее количество факторов.

Сохранённые кадры используются для последующей отработки программного обеспечения приборов без применения самих приборов. В процессе работы программа выводит в статусное окно основную информацию о последнем сгенерированном кадре: параметры орбиты и ориентации КА, скорость его вращения, число попавших в поле зрения прибора звёзд, краткую информацию об этих звёздах, номер сгенерированного кадра и его образ. Интерфейс для контроля работы программы показан на *рис. 9*.

The screenshot displays the FrameMaker software interface, which is divided into several sections:

- Расчетные параметры вращения (Calculation rotation parameters):**
  - Угловая скорость: 0°05'05"
  - 0°00'00"
  - 1°21'20"
  - Линейная скорость: -0.055
  - 0.000
  - 0.032
- Расчетные углы ориентации (Calculation orientation angles):**
  - Прямое восхождение: 2°32'41"
  - Склонение: 60°12'22"
  - Азимут: 108°28'01"
- Данные текущего наблюдения (Current observation data):**
  - Время наблюдения: 00:00:30.500
  - Число звезд в кадре: 5
  - Номер кадра: 306
- Характеристики звезд в кадре (Star characteristics in the frame):**

Ns	Is	Xs	Ys	Mv	Sp
6041	6987	211.923	121.320	6.3	G9
8565	4766	121.594	53.170	6.5	B9
16211	12116	60.840	142.526	7.0	C5
30415	1505	168.802	18.950	7.8	G0
40325	1295	140.188	160.422	8.1	G9
- Образ контрольного кадра (Control frame image):** A dark rectangular area representing the star field image.
- Buttons:** "Старт" (Start) and "Стоп" (Stop) buttons are located at the bottom left.

*Рис. 9.* Интерфейс для контроля работы программы FrameMaker, отображающий основные параметры

В завершение следует отметить, что программа SkyViewer хорошо зарекомендовала себя при отработке уже нескольких сотен приборов звёздной ориентации. Опыт использования программы FrameMaker пока невелик, но с ней связаны перспективы создания аппарата полного, всестороннего моделирования звёздного прибора до начала его производства.

## Литература

1. Аванесов Г.А., Акимов В.В., Воронков С.В. (2003а) Исследование влияния заряженных частиц на функционирование астронавигационных приборов // Изв. высш. учеб. заведений. Приборостроение. 2003. Т. 46. № 4. С. 79–83.
2. Аванесов Г.А., Воронков С.В., Форш А.А. (2003б) Стенд для динамических испытаний и геометрической калибровки астронавигационных приборов // Изв. высш. учеб. заведений. Приборостроение. 2003. Т. 46. № 4. С. 74–79.
3. Аванесов Г.А., Кондратьева Т.В., Никитин А.В., Шамис В.А. Моделирование работы приборов звездной ориентации в наземных условиях // Космическое приборостроение: сб. тр. семинара. М.: ИКИ РАН, 2006. С. 16–17.
4. Аванесов Г.А., Акимов В.В., Воронков С.В. (2009а) Результаты испытаний ПЗС-матриц российского и зарубежного производства на источниках заряженных частиц // Всероссийская научно-техн. конф. «Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов»: сб. тр. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 447–457.
5. Аванесов Г.А., Воронков С.В., Дунаев Б.С., Красиков В.А., Шамис В.А., Форш А.А. (2009б) Имитаторы звездного неба для наземной отработки датчиков звездной ориентации // Всероссийская научно-техн. конф. «Современные проблемы определения ориентации и навигации космических аппаратов»: сб. тр. М.: ИКИ РАН, 2009. С. 372–386.

## Modeling of images of the starry sky in problems of ground testing of orientation sensors

G. A. Avanesov, V. A. Shamis, Ya. D. Elyashev

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: eluashev-jak@yandex.ru

To test the stellar orientation sensors, two programs for simulating the images of the starry sky were created at the Optical Physics Department of the Space Research Institute RAS. SkyViewer software projects an image of the starry sky onto the dynamic test bench screen. At this stand, the functioning of all stellar orientation devices is tested, and the mathematical apparatus used by them is checked. FrameMaker creates a frame of the starry sky that is identical to the real frames received by the star orientation sensors. These frames allow testing the software at the design and development stage of the stellar orientation sensor without using real instruments. Both programs use the same software modules. These modules are responsible for generating the orbit of the spacecraft (SC), calculating the three-axis motion of the spacecraft, calculating the photometric characteristics of the devices, projecting the starry sky into the plane of the photodetector or monitor screen, forming images of stars in this plane, calculating aberrations, generating extraneous noise and interference on the final image, as well as saving and displaying the results. This article outlines the principles of operation of both programs, and also discusses the main functions of each software module.

**Keywords:** star orientation sensor, starry sky, dynamic test bench, satellite orbit, triaxial satellite motion, photometry, projection of the starry sky onto a plane, star image, aberration, random and structural noise

Accepted: 25.02.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-2-82-94

### References

1. Avanesov G. A., Akimov V. V., Voronkov S. V. (2003a), Charged particles influence research on functioning of astro-navigational devices, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie*, 2003, Vol. 46, No. 4, pp. 79–83 (in Russian).
2. Avanesov G. A., Voronkov S. V., Forsh A. A. (2003b), Bench for dynamic tests and geometrical calibration of astro-navigational devices, *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Priborostroenie*, 2003, Vol. 46, No. 4, pp. 74–79 (in Russian).
3. Avanesov G. A., Kondrat'eva T. V., Nikitin A. V., Shamis V. A., Modeling the operation of stellar orientation devices in ground conditions, *Kosmicheskoe priborostroenie* (Design of space instruments: Proc. workshop), Moscow: IKI RAN, 2006, pp. 16–17 (in Russian).
4. Avanesov G. A., Akimov V. V., Voronkov S. V. (2009a), Results of tests of CCD-matrices of Russian and foreign production at sources of charged particles, *Sbornik trudov Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Sovremennye problemy orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov"* (Proc. All-Russia Scientific and Technological Conf. "Contemporary problems of spacecraft attitude determination and control"), Moscow: IKI RAN, 2009, pp. 447–457 (in Russian).
5. Avanesov G. A., Voronkov S. V., Dunaev B. S., Krasikov V. A., Shamis V. A., Forsh A. A. (2009b), Starry sky simulators for ground testing of star orientation sensors, *Sbornik trudov Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Sovremennye problemy orientatsii i navigatsii kosmicheskikh apparatov"* (Proc. All-Russia Scientific and Technological Conf. "Contemporary problems of spacecraft attitude determination and control"), Moscow: IKI RAN, 2009, pp. 372–386 (in Russian).