

УДК 681.3

3D ИНТЕРАКТИВНАЯ МОДЕЛЬ НАБЛЮДЕНИЙ АСТЕРОИДОВ. ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ ТЕЛЕСКОПА И ПЗС – НАБЛЮДЕНИЯ

К. В. Алексеев,
аспирант

Н. Н. Решетникова,

канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

В статье рассматриваются методы наблюдения малых планет из главного пояса Солнечной системы, астероидов АСЗ, объектов искусственного происхождения в околоземном космическом пространстве с помощью наземных ПЗС-телескопов. Эти методы используются в качестве основы для построения интерактивной трехмерной модели процесса наблюдения, визуализация которого позволит повысить точность реальных наблюдений для элементов орбит и параметров указанных объектов.

This article is devoted to the Solar system's minor planets, asteroids, near Earth space artificial satellites, observational methods by using land-based CCD telescopes. These methods are using as a base of interactive 3D model processing, and it's visualisation is to organize real observations to improve orbit of the elements and the parameters of pointed objects

Введение

В начале XIX века итальянский астроном Джузеппе Пиацци (1746–1826) открыл первую малую планету (астероид) диаметром около 933 км, которая была названа Церерой. Это открытие послужило началом эры исследования малых планет (МП). К настоящему времени обнаружено уже более 230 тыс. астероидов Главного пояса Солнечной системы, из которых более 90 тыс. получили постоянные номера, имеют определенные элементы орбит и диаметры от нескольких метров до сотен километров. Под воздействием гравитационных сил орбиты астероидов изменяются, в результате чего возможны столкновения их между собой или падения на поверхности больших планет, в том числе и на Землю. Как следствие, астероиды, сближающиеся с Землей (АСЗ), вызывают повышенный интерес. Современные приемники излучения, которыми оснащены наземные телескопы, позволяют регистрировать астероиды до минимальных размеров около метра в диаметре. Это стало возможным благодаря использованию в астрономии ПЗС-приемников, основой которых являются приборы с зарядовой связью,

относящиеся к классу твердотельных полупроводниковых приборов.

В статье рассматриваются методы наблюдения посредством наземных ПЗС-телескопов малых планет из Главного пояса Солнечной системы, АСЗ, объектов искусственного происхождения в околоземном космическом пространстве, которые служат основой построения интерактивной трехмерной модели процесса наблюдения. Визуализация этого процесса позволит организовать реальные наблюдения с целью уточнения элементов орбит и параметров указанных объектов. Модель реализована с использованием технологий представления трехмерных виртуальных пространств в Интернет и демонстрирует работу наземного телескопа в режиме кадровых наблюдений, режиме суточного ведения и наблюдениях при неподвижном телескопе, а также обеспечивает возможность интерактивного взаимодействия с пользователем в реальном времени. По существу, речь идет о разработке и создании интерактивного планировщика астероидных наблюдений (ИПАН).

Актуальность моделирования обусловлена большим интересом к проекту создания всемирной виртуальной обсерватории, который откры-

ваает широкие возможности доступа к последним данным наблюдений космических объектов как специалистам в области астрономии и космонавтики, так и любителям астрономии. В рамках проекта модель может быть использована в качестве интерфейса нового поколения.

Рассмотрим методы наблюдений астероидов на примере малой планеты (МП) Aurora-94. Первый этап реализации ИПАН включает подготовку установочных координат телескопа, реализацию модели позиционирования виртуального телескопа, моделирование наблюдений астероидов посредством регистрирующей ПЗС-камеры, просмотр ПЗС-кадров. Следующий этап развития ИПАН состоит из процедуры обработки ПЗС-изображений, отождествления полученных данных, обработки и получения координат астероида в системе опорных звезд, формирования базы первичных данных в формате виртуальной обсерватории (ВО) и является темой дальнейших разработок.

Режимы работы ПЗС-камеры

В основу работы ПЗС-камеры, расположенной на окулярном конце трубы телескопа, положен принцип использования ПЗС-приемника в режиме дрейфового сканирования при синхронном перемещении регистрируемых объектов в поле зрения телескопа и зарядовых пакетов, и в кадровом режиме, когда продолжительное накопление обеспечивается угловым перемещением трубы телескопа со скоростью суточного вращения Земли [2, 6]. Также су-

ществуют различные комбинированные режимы наблюдения небесных объектов. Рассмотрим моделирование двух базовых режимов.

1. Кадровый режим (stare or tracking mode). В этом режиме в течение установленного программой времени, т. е. времени экспозиции, выполняется накопление зарядовых пакетов при суточном ведении телескопа. Диапазон возможных экспозиций лежит в пределах от десятков миллисекунд до десятков минут, определяется яркостью регистрируемого объекта, точностью привода телескопа и ограничен величиной фона неба и темнового сигнала ПЗС-матрицы. Указанный режим широко распространен и используется для наблюдения любых объектов в видимой зоне небесной сферы.

2. Режим накопления с синхронным переносом зарядовых пакетов или режим сопровождения (drift scan mode). В этом режиме накопление выполняется одновременно с переносом зарядовых пакетов. Скорость переноса зарядовых пакетов вдоль столбцов матрицы должна равняться скорости перемещения изображения наблюдаемого объекта в плоскости матрицы. Режим используется при неподвижном телескопе и для объектов, перемещающихся в поле зрения телескопа. Время накопления определяется расстоянием, которое должно пройти изображение объекта по ПЗС-матрице. Угловой размер полученного кадра по склонению определяется линейным размером ПЗС-матрицы, по прямому восхождению устанавливается программно, ограничен продолжительностью ночного времени и стабильностью положения телескопа и ПЗС-камеры.



■ Рис. 1. Алгоритм моделирования процесса наблюдения

ПЗС-регистрирующее устройство предназначается для определения яркости в определенной фотометрической системе и координат регистрируемых объектов в прямоугольной системе координат, которая задается направлением столбцов и строк матрицы. В ходе дальнейшей обработки с использованием методов фотографической астрометрии определяются сферические координаты, на основании которых при наличии достаточного объема наблюдений определяются и уточняются элементы орбит.

Последовательность этапов моделирования для уточнения траектории МП

Процесс моделирования состоит из следующих операций (рис. 1).

1. По известным параметрам орбиты МП Aurora-94 с помощью программного пакета Eros Пулковской астрономической обсерватории [12] вычисляются ее экваториальные координаты для заданного периода наблюдений (01.03.05–31.03.05).

2. По траектории движения МП Aurora-94 на фоне опорных звезд небесной сферы определяется зона выборки опорных звезд из наиболее точного доступного каталога положений звезд, например, каталогов Tycho2, UCAC2, USNO-B1 и др. При этом ширина полосы опорных звезд определяется угловыми размерами кадра используемой ПЗС-матрицы, в зависимости от масштаба поля зрения телескопа.

3. Вычисление установочных координат телескопа.

4. Анимация виртуального телескопа (за основу выбран реально действующий телескоп Николаевской астрономической обсерватории – скоростной автоматический телескоп САК [11]).

5. Моделирование процесса установки (позиционирование) виртуального телескопа и ПЗС-наблюдений с ним.

6. Просмотр ПЗС-кадров.

Вычисление координат, определяющих траекторию движения МП Aurora-94

В табл. 1 приведены данные МП Aurora-94, вычисленные с помощью программного пакета Eros для заданного периода наблюдений [12].

На рис. 2 показан участок траектории движения МП Aurora-94 (сплошная линия). Полоса регистрации ПЗС-камеры задается шириной ±15' от центральной траектории МП. Значение ширины полосы 30' выбрано исходя из реальных угловых размеров ПЗС-матрицы САК [10].

Используя встроенные или подключаемые к программной системе звездные каталоги Tycho2, UCAC2, USNO-B1 и другие [5, 7, 10], можно в любой выбранный на траектории МП момент времени *T* получить площадку с набором опорных звезд и вспомогательных данных – номера и количество звезд, их координаты и моменты времени, спектр, звездные величины, угловой диаметр (для астероида). На основе выявленных максимумов распреде-

■ **Таблица 1.** Данные движения малой планеты Aurora-94 за период 01.03.05 – 31.03.05, полученные с помощью пакета Eros Пулковской обсерватории

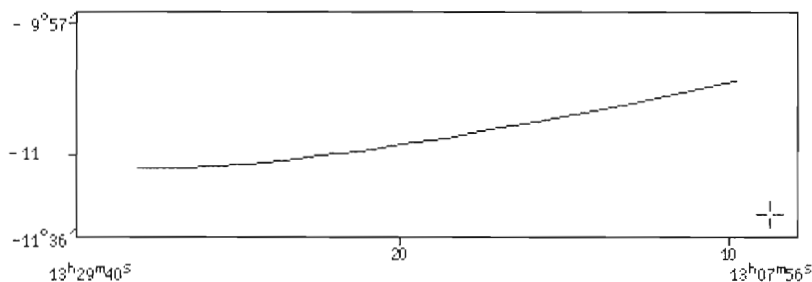
94 Aurora Compressed Ephemeris DE200/LE20 DT
 Apparent coordinates Equinox: INST Accuracy ELLIPTIC
 Nikolaev Long.= 31.97470 r*cos phi'= .683590 r*sin phi'= .727430

Дата YYYY MM DD.DD	Положение по α	Положение по δ	Расстояние от Земли	Расстояние от Солнца	Фаза вращения	Звездная величина	Величина вращения
2005 03 01.00	13 28 08.9055	-11 08 26.228	2.54067579	3.325	12.0	12.9	136.0W
2005 03 03.00	13 27 23.8204	-11 08 38.078	2.52158776	3.326	11.5	12.9	138.1W
2005 03 05.00	13 26 34.0417	-11 08 23.629	2.50331561	3.328	11.0	12.9	140.3W
2005 03 07.00	13 25 39.6659	-11 07 42.959	2.48589659	3.329	10.4	12.8	142.5W
2005 03 09.00	13 24 40.8159	-11 06 36.223	2.46936812	3.330	9.9	12.8	144.8W
2005 03 11.00	13 23 37.6591	-11 05 03.795	2.45376654	3.331	9.3	12.8	147.0W
2005 03 13.00	13 22 30.4076	-11 03 06.331	2.43912575	3.332	8.8	12.7	149.3W
2005 03 15.00	13 21 19.2938	-11 00 44.645	2.42547647	3.334	8.2	12.7	151.5W
2005 03 17.00	13 20 04.5556	-10 57 59.590	2.41284639	3.335	7.6	12.6	153.8W
2005 03 19.00	13 18 46.4397	-10 54 52.040	2.40126066	3.336	6.9	12.6	156.1W
2005 03 21.00	13 17 25.2062	-10 51 22.927	2.39074221	3.337	6.3	12.6	158.4W
2005 03 23.00	13 16 01.1314	-10 47 33.262	2.38131185	3.338	5.7	12.5	160.7W
2005 03 25.00	13 14 34.5084	-10 43 24.157	2.37298837	3.339	5.0	12.5	163.0W
2005 03 27.00	13 13 05.6469	-10 38 56.839	2.36578876	3.341	4.3	12.4	165.3W
2005 03 29.00	13 11 34.8694	-10 34 12.647	2.35972854	3.342	3.7	12.4	167.6W
2005 03 31.00	13 10 02.5036	-10 29 13.001	2.35482212	3.343	3.0	12.4	169.8W

U

Begin 2453430.500774
2005 03 1.001
End 2453460.500777
2005 03 31.001

94 Aurora
10094 1991 DK
100 Hekate
107 Camilla



Catalog : TУС-2I

■ Рис.2. Траектория движения МП Aurora-94 с 01.03.05 по 31.03.05

ления опорных звезд в равномерно распределенных площадках, принимая минимально допустимое число звезд, необходимое для достоверного получения наиболее высокой точности положений определяемых объектов (астероиды, АСЗ и др.), равным, по крайней мере, трем, можно определить оптимальные моменты регистрации ПЗС-кадров (площадок), которые будут содержать наибольшее количество опорных звезд с точными координатами. Также можно найти оптимальную конфигурацию опорных звезд для наблюдений выбранного объекта или изучить участки неба, где пересекаются видимые пути двух или более объектов, с тем, чтобы выбрать общие опорные звезды.

При выборе времени регистрации ПЗС-кадров, а следовательно, и их положения на небесной сфере (по орбите астероида) следует принимать во внимание наличие в ПЗС-кадре таких вызывающих интерес дополнительных объектов, как внегалактические радиоисточники, другие нумерованные или неизвестные астероиды, объекты из стандартных, калибровочных площадок, явления видимых покрытий и сближений астероидов между собой и со звездами из высокоточных каталогов Hipparcos, Tycho2.

Для программно-управляемого телескопа выборка оптимальных моментов наблюдений может выполняться автоматически, т. е. реализуется адаптивный режим виртуального телескопа.

Расчет установочных координат

В основном цикле управления используется следующий порядок расчета установочных координат.

1. Расчет текущего звездного времени (осуществляется после считывания значений по координатам A, Z). Пересчет текущих координат α, δ в A, Z .

2. Расчет поправки на рефракцию в Z телескопа.

3. Расчет поправок в установочные координаты телескопа.

4. Учет поправок и рефракции в координаты A и Z , P телескопа и пересчет их в координаты α, δ телескопа.

5. Коррекция текущих координат α, δ с учетом скорости движущегося объекта

Здесь A – положение объекта по азимуту; Z – положение объекта по зенитному расстоянию; P – параллактический угол; α – прямое восхождение объекта; δ – склонение объекта.

Получение информации о текущем звездном времени

Для точного наведения телескопа на объект и дальнейшего сопровождения этого объекта необходимо предварительный ввод текущего времени с заданной точностью. В представленной методике используется московское время и рассчитывается величина текущего звездного времени, которая в дальнейшем используется для пересчета координат α, δ в A, Z .

Методика расчета звездного времени опирается на известные из курса сферической астрономии формулы [3, 4]. Необходимо учитывать время, принятое в избранном часовом поясе, где долгота места наблюдения λ , а московское время M_0 . Тогда перевод M_0 в стартовое звездное время S_{L0} производится по формуле

$$S_{Lo} = S_{G0} + (M_0 - 3^h)K' + \lambda, \quad (1)$$

где S_{G0} – звездное истинное время в гринвичскую полночь;

M_0 – московское время наблюдения;

λ – долгота телескопа (для САК $\lambda = 2^h07^m54^s$);

K' – коэффициент перевода промежутков среднего солнечного времени в промежутки звездного времени, $K' = 1,0027379093$;

3^h – поправка на декретное время (или 4 часа для летнего времени).

Расчет азимутальных координат. Производится пересчет текущих экваториальных координат α и δ , на текущий момент звездного времени S , в азимутальные координаты A , Z [3, 4].

Вычисляется часовой угол объекта t (в градусах) по формуле

$$t = 15(S - \alpha). \quad (2)$$

Используя формулы сферической тригонометрии, можно получить:

$$\cos Z = \cos \varphi \cos \delta \cos t + \sin \varphi \sin \delta; \quad (3)$$

$$\operatorname{tg} A = \frac{\cos \delta \sin t}{\cos \delta \sin \varphi \cos t - \cos \varphi \sin t}. \quad (4)$$

Для вычисления параметра P используются следующие формулы:

$$\sin P = \frac{\sin t \cos \varphi}{\sin Z}; \quad (5)$$

$$\cos P = \frac{\sin \varphi \cos \delta - \sin \delta \cos \varphi \cos t}{\sin Z}; \quad (6)$$

$$P = \operatorname{arctg} \frac{\sin P}{\cos P}. \quad (7)$$

Для решения проблемы выбора из двух возможных положений по A в северной зоне (при $A > 120^\circ$ или $A < -120^\circ$) в алгоритм расчета A входит значение азимута сравнения. Выбирается значение ближайшее, к азимуту сравнения.

Расчет поправки на рефракцию. Явление преломления световых лучей при прохождении ими земной атмосферы называется астрономической рефракцией, или углом рефракции, или рефракцией r . Если видимое зенитное расстояние светила Z' , а истинное зенитное расстояние Z , то Z можно определить как $Z = Z' + r$, т. е. истинное зенитное расстояние небесного объекта больше видимого на величину рефракции r .

Рефракция зависит не только от высоты объекта над горизонтом, но и от состояния атмосферы, главным образом от ее плотности, которая сама является функцией, в основном температуры и давления.

Поправки на рефракцию рассчитываются при давлении B и температуре t по формуле [3, 4]:

$$\Delta Z_{\text{реф}} = -60,25 \frac{273B}{760(273 + t)} \times$$

$$\times \operatorname{tg} Z \left(1 - \frac{273 + t}{273} 0,00726 \operatorname{sec}^2 Z\right), \quad (8)$$

где B – давление (мм. рт. ст); t – температура атмосферы ($^\circ\text{C}$).

Поправки на влияние рефракции ($\delta_{\text{реф}}$), нуль-пункты разделенных кругов по α и δ (α_0 , δ_0) вводятся в вычисленные на моменты наблюдений положения небесных объектов ($\alpha_{\text{вид}}$, $\delta_{\text{вид}}$) и являются установочными параметрами телескопа:

$$\alpha_{\text{уст}} = \alpha_{\text{вид}} + \alpha_0; \quad (9)$$

$$\delta_{\text{уст}} = \delta_{\text{вид}} + \delta_0 + \delta_{\text{реф}}.$$

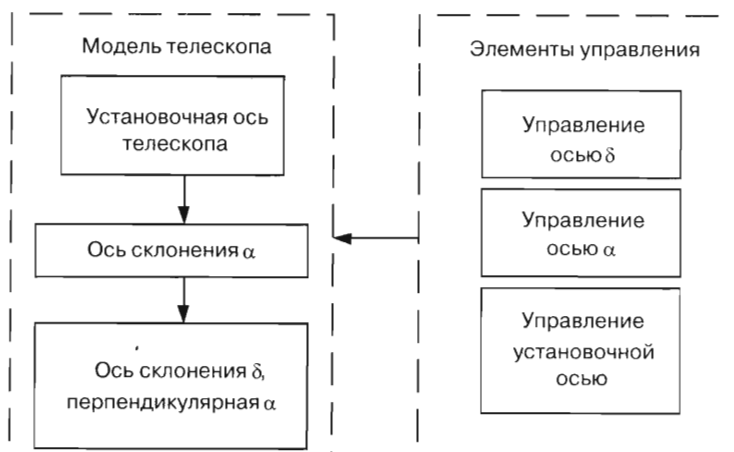
Влияние кривизны суточной параллели не учитывается, ввиду ее незначительности (менее $1''$) при наблюдениях МП вблизи плоскости меридиана при отклонении не более 15° .

Описание трехмерной модели телескопа

Моделирование технических процессов, а также создание моделей реальных объектов является актуальной задачей для решения широкого круга технических проблем. В рассматриваемом случае моделируется работа телескопа для изучения особенностей методов наблюдения МП с ПЗС-наземных телескопов. Конструирование модели, реализующей работу конкретного реального прибора, требует длительного и трудоемкого его исследования. Поэтому в данной разработке реализована только общая модель, использующая основные принципы, алгоритмы и особенности конструкции САК-М1.0. В качестве модели приведена базовая конструкция монтировки телескопа САК-М1.0. Для моделирования процесса наблюдения выбрано 16 временных значений, в которых были проведены измерения координат МП Auriga-94 с 01.03.05 по 31.03.05 г. Для моделирования интерактивной части, а именно движения телескопа, движения малой планеты, создания спецэффектов, использовался язык моделирования виртуальной реальности VRML. Особенностью языка VRML является то, что сцены, созданные с его помощью, интерактивны и интерпретируются с использованием Internet Explorer с установленным VRML браузером.

Модель телескопа создана при помощи пакета трехмерного моделирования 3D MAX 5.0 с дальнейшим переводом в стандарт X3D/VRML [13]. Для демонстрации возможностей телескопа промоделированы режимы автоматической работы телескопа по наблюдению тел Солнечной системы на примере МП Auriga-94. Для обеспечения интерактивного взаимодействия пользователя с телескопом созданы элементы управления с использованием языка Java, VRML.

Нижеприведенный скрипт, а точнее, набор маршрутов языка VRML в сочетании с примитивами и скриптами языка VRML, позволяет управлять монтировкой телескопа по оси α .



■ Рис. 3. Структура взаимодействия элементов телескопа

```
ROUTE_1.trackPoint_changed TO _ScriptAlfa.a
    \ использование цилиндрического датчика, при работе которого начинает выполняться Java – скрипт (ScriptAlpha.a), отвечающий за вращение по оси склонения α \

ROUTE_ScriptAlfa.dr TO _Sigma.rotation
    \ угол вращения группы объектов Sigma \

ROUTE_PlanS1.translation_changed TO _begunok1.translation
    \ работа элемента управления для передачи угла поворота элементов телескопа по заданной оси \

ROUTE_14.orientation_changed TO _0.set_rotation
ROUTE_14.position_changed TO _0.translation
ROUTE_14.position_changed TO _14.center
ROUTE_PlanS1.translation_changed TO _ScriptAlfa.a
    \ использование элемента управления для передачи угла поворота оси склонения телескопа \
```

определенным принципам. Структура взаимодействия элементов приведена на рис. 3.

Трехмерная модель телескопа (рис. 4) представляет собой виртуальный аналог автоматического комплекса САК-М1.0 [9]. Виртуальный телескоп как отдельный сложный объект включен в трехмерную модель фрагмента карты звездного неба с движущейся по расчетной траектории планеты Aurora-94. Пульт управления, представленный в модели, позволяет корректировать положение телескопа в интерактивном режиме. Модель позволяет получить представление о работе комплекса САК-М1.0 и задачах автоматизации процесса наблюдения за движением МП и АСЗ в режимах: кадрового наблюдения; суточного ведения; наблюдения при неподвижном телескопе.

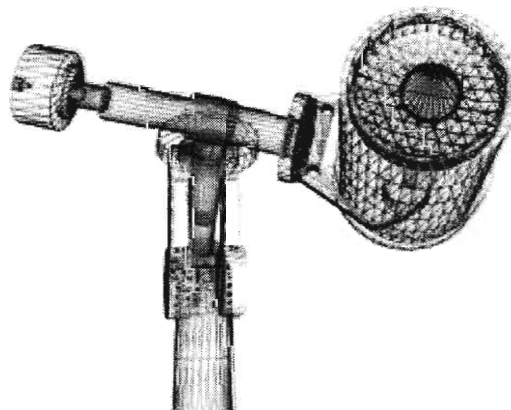
Используется экваториальная (параллактическая) монтировка с приводами на полярную ось и ось склонений. В качестве главной трубы, укрепленной на массивной колонне (установка немецкого типа), применен менисковый телескоп системы Д. Д. Максудова [11]. На окулярном конце трубы установлена ПЗС-камера; труба уравновешена противовесами и отцентрирована.

Для демонстрации режимов работы по сопровождению МП были интерполированы значения, приведенные в табл. 1, и рассчитан маршрут следования монтировки телескопа при наведении на МП в режимах сопровождения и сканирования.

К возможностям модели следует отнести:

- вращение телескопа по двум осям склонения;
- наблюдение двух режимов функционирования виртуальной модели МП Aurora-94 (режим суточного ведения, режим сопровождения);
- получение представления о методологии создания ПЗС-кадров при помощи САК-1.0М;
- выполнение в кадровом режиме ПЗС-наблюдений МП Aurora-94 на виртуальной модели (суточное ведение).

Алгоритмы ведения по A, Z выполнены на основе данных программного пакета Epos (см. табл. 1). На основе этих данных производится интерполяция значений положения осей модели телескопа в соответствии с реально заложенными алгоритмами реального телескопа. Модель состоит из набора узлов, которые взаимодействуют по



■ Рис. 4. VRML-модель САК-М1.0 Николаевской астрономической обсерватории

Расчет поправок на деформацию конструкции телескопа

Конструкция телескопа имеет значительный вес и подвержена деформациям и другим явлениям, которые, в свою очередь, вносят погрешность в наведении на наблюдаемый объект. Существует несколько методик определения конструктивных параметров телескопа, влияющих на точность наведения. На практике чаще всего применяют метод коррекции с использованием экспериментальных измерений и установки положения телескопа с учетом полученных поправок [8].

Формулы расчета поправок выглядят следующим образом:

$$\Delta A = K_0 + K_1 \frac{1}{\operatorname{tg} Z} + K_2 \frac{1}{\sin Z} - K_3 \frac{\sin A}{\operatorname{tg} Z} + K_4 \frac{\cos \delta \cos P}{\sin Z}; \quad (10)$$

$$\Delta Z = K_5 + K_6 \sin Z + K_7 \cos Z + K_3 \cos A + K_4 \cos \varphi \sin A, \quad (11)$$

где $K_0 (A_0)$ – поправка нуля-пункта по азимуту A ; $K_1 (L)$ – поправка за наклон горизонтальной оси; $K_2 (k)$ – коллимационная ошибка; $K_3 (F)$ – широтная ошибка вертикальной оси; $K_4 (\Delta S)$ – поправка часового угла; $K_5 (Z_0)$ – поправка нуля-пункта по зенитному расстоянию Z ; $K_6 (d)$ – коэффициент горизонтального гнуптия трубы; $K_7 (d_1)$ – коэффициент вертикального гнуптия трубы.

Общие принципы наведения

1. Управляемый разгон выполняется с ограниченным ускорением a , т. е. имеет место программное увеличение скорости задания v на каждом шаге управления на $a/10$.

Скорость возрастает либо до максимально установленного значения ($v_{\max A}$, $v_{\max Z}$), либо до меньшего (при переезде на небольшие расстояния).

2. Дальнейшее движение выполняется на постоянной скорости v_{\max} .

3. Торможение выполняется как равнозамедленное движение с постоянным ускорением торможения $a_{\text{торм}}$.

4. Если по одной координате телескоп достиг заданного значения, а по другой еще нет – включается режим непрерывного отслеживания положения, который необходим либо из-за движения объекта, либо из-за разбаланса усилителя привода координаты.

5. Если рассогласование по координате меньше установленного значения $\Delta_{\text{уст}}$, то считается, что телескоп достиг нужного положения. Когда это условие выполняется для обеих координат, то включается счетчик времени $t_{\text{уст}}$, который должен принять определенное значение, чтобы режим наведения считался законченным.

Режим наведения

Наведение на объект. В режиме наведения производится дополнительный расчет $A_{\text{упр}}$ и $Z_{\text{упр}}$ объекта на момент звездного времени:

$$S_{\text{упр}} = S + \Delta t_{\text{упр}}, \quad (12)$$

где $\Delta t_{\text{упр}}$ – время упреждения, равное предполагаемому времени смены режима наведение – ведение. Оно складывается из предполагаемого времени остановки приводов и времени разгона привода ведения до базовой скорости объекта. Базовая скорость объекта получается из этого же расчета. Например, по азимуту:

$$v_{A \text{ баз}} = \frac{A_{\text{упр}} - A_{\text{тек}}}{\Delta t_{\text{упр}}}. \quad (13)$$

Скорость по Z рассчитывается аналогично. В дальнейшем именно $A_{\text{упр}}$ и $Z_{\text{упр}}$ используются для расчета рассогласований. Относительная скорость торможения и отработки рассогласования, для слежения за объектом, рассчитывается по формуле:

$$v_{\text{отн}} = \sqrt{2|\Delta| a_{\text{торм}} + a^2} - a_{\text{торм}}, \quad (14)$$

где $a_{\text{торм}}$ – ускорение торможения; Δ – рассогласование.

Скорость задания на привод устанавливается как

$$v_{\text{прив}} = v_{\text{отн}} + v_{\text{баз}} + \Delta v, \quad (15)$$

где Δv – поправка скорости привода. В большинстве случаев она равна нулю. После определенного времени нахождения в зоне начинается приращение Δv на $0,01''/\text{с}$.

Наведение на фиксированное положение по A и Z . При моделировании данного режима необходима установка телескопа в фиксированное положение с достаточной точностью приводами наведения. Для этого определяется минимальная скорость $v_{\min} = 1''/\text{с}$, которая больше зоны нечувствительности привода, и зона движения на минимальной скорости Δ_{\min} . Также рассчитывается зона Δ_{\max} – начало равнозамедленного торможения от скорости v_{\max} так, чтобы скорость движения снизилась до v_{\min} к моменту подъезда к зоне Δ_{\min} :

$$\Delta_{\max} = \frac{v_{\max}^2 - v_{\min}^2}{2a_{\text{торм}}} + \tau v_{\max} + \Delta_{\min}, \quad (16)$$

где τ – время задержки отработки привода.

Скорость в зоне торможения рассчитывается по формуле:

$$v = \sqrt{2(|\Delta| - \Delta_{\min}) a_{\text{торм}} + v_{\min}^2} - \tau a_{\text{торм}}. \quad (17)$$

В интервале значений от Δ_{\min} до $\Delta_{\text{уст}}$ устанавливается постоянная скорость, а начиная с $\Delta_{\text{уст}}$ скорость равномерно уменьшается до нуля. Если телескоп по одной координате уже подъехал, а по

второй еще едет – включается расчет поправки скорости привода Δv .

Режим сопровождения

Алгоритм ведения. В отличие от алгоритма наведения алгоритм сопровождения имеет несколько этапов, которые последовательно сменяют друг друга. На каждом из этих этапов решаются разные задачи и, соответственно, работают разные алгоритмы управления приводом ведения. На каждом такте управления производится расчет базовых скоростей объекта путем расчета координат A, Z, P с упреждением на одну секунду. Разница с текущими координатами и дает значения этих скоростей. Далее рассчитывается рассогласование как разница между текущими (расчетными) и измеренными (реальными) координатами.

Слежение за объектом. В этом режиме обеспечивается точная установка телескопа на объект и максимально качественное его сопровождение. При этом возможны два режима работы: 1) учет рассогласования; 2) определение поправки скорости привода.

Скорость управления приводом рассчитывается по формуле

$$V_{\text{прив}} = V_{\text{баз}} + V_{\text{расс}} + V_{\text{попр}}, \quad (18)$$

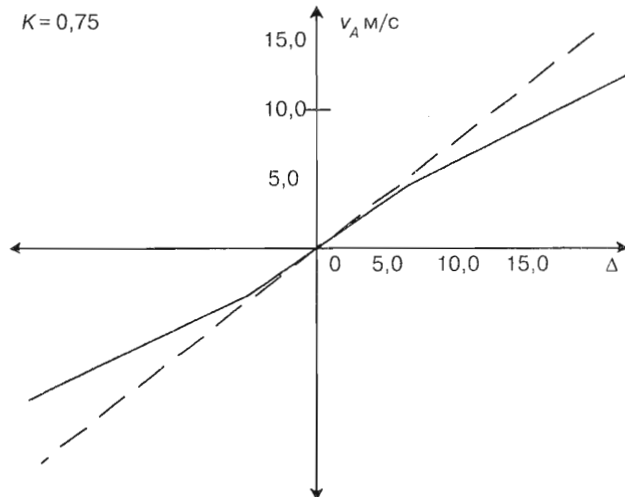
где $V_{\text{баз}}$ – базовая скорость объекта; $V_{\text{расс}}$ – добавка к скорости для слежения по рассогласованию; $V_{\text{попр}}$ – поправка скорости привода.

1. Учет рассогласования. Скорость рассогласования рассчитывается по формуле

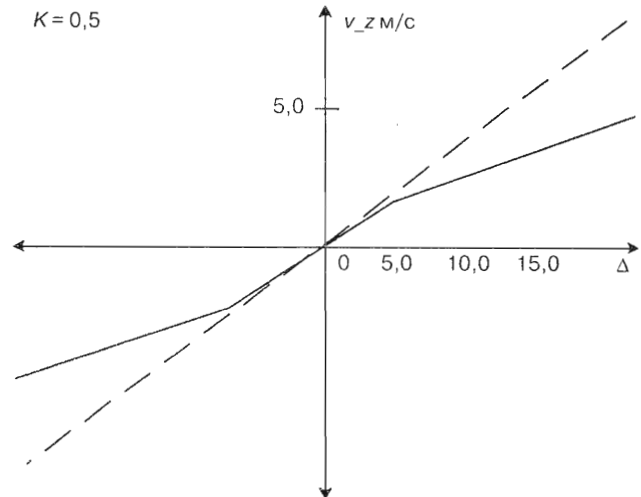
$$V_{\text{расс}} = \sqrt{2|\Delta|a + \left(\frac{a}{k}\right)^2} - \frac{a}{k}, \quad (19)$$

где k – коэффициент отработки.

Для координаты A коэффициент $k_A = 0,75$, для Z коэффициент $k_Z = 0,5$.



■ Рис. 5. Зависимость скорости v от рассогласования для $A, K = 0,75$



■ Рис. 6. Зависимость скорости v от рассогласования для $Z, K = 0,5$

На рис. 5, 6 представлена зависимость скорости v от рассогласования для координат A и Z .

2. Расчет поправки скорости привода. Поправка скорости привода рассчитывается по формуле

$$V_{\text{попр}} = V_{\text{попр}(n-1)} + \Delta k_{\text{попр}}, \quad (20)$$

где $\Delta k_{\text{попр}}$ – поправки по A, Z .

Условия внесения поправки:

рассогласования не слишком большие, а именно установленные в пределах (5% скорости привода для A, Z);

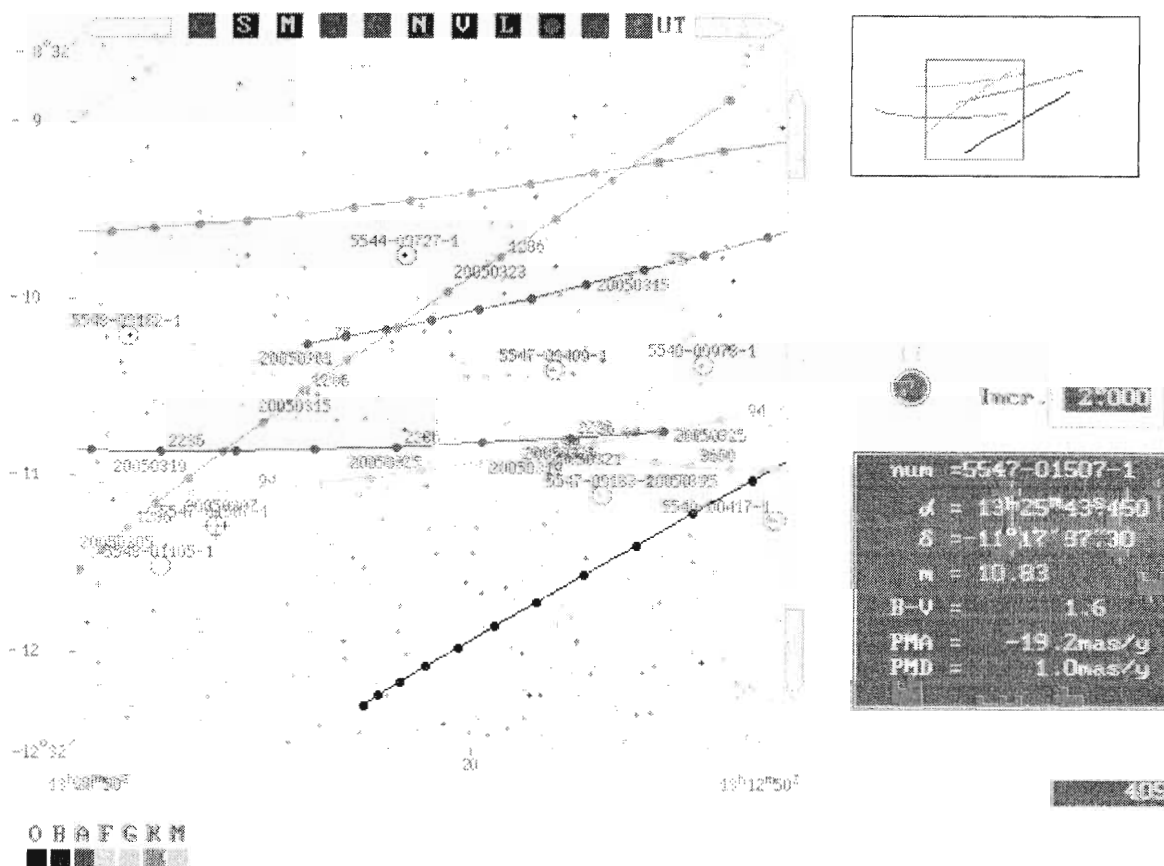
изменения за последние две секунды не превышают $0,35''$.

Для проверки выполнения условий, а также для избежания колебаний телескопа на главной резонансной частоте со стороны управления имеет смысл использование цифрового фильтра, отслеживающего величину поправки. В случае, если рассогласование увеличилось до предельных значений, то фаза слежения возвратится в фазу переезда на объект.

Получение ПЗС-кадров

Рассмотрим наиболее широко применяемый кадровый режим получения ПЗС-изображений отдельных площадок неба, включающих искомый объект (объекты), опорные звезды и другие не программные объекты, в том числе и ложные изображения.

Используемая методика наблюдений состоит в определении положения астероида из серии последовательных наблюдений (кадров) в течение одной ночи. Продолжительность экспозиции одного кадра составляет для не слишком слабых объектов в среднем 3–5 мин. Это позволяет получить точечные изображения объекта и опорных звезд на одном кадре. Сравнение соседних в серии кадров (в количестве от двух до десяти) дает



■ Рис. 7. Наблюдение движения МП Auriga-94 на фоне опорных звезд в поле 4,0' на 4,0'

возможность выделить движущиеся объекты на фоне неподвижных звезд, среди которых могут находиться как дополнительные (нумерованные) объекты, так и новые объекты, требующие отождествления. Такая серия позволяет получить среднее положение объекта и оценить точность его координат за ночь, в зависимости от качества ПЗС-изображений, влияние атмосферы и электронной части ПЗС-камеры, привода телескопа и других факторов.

Практика ПЗС-наблюдений в астрономических обсерваториях показывает, что для надежного выявления астероидов Главного пояса достаточно перекрытий наблюдаемой площадки в течение часа. Для выявления астероидов с меньшей угловой скоростью необходимо увеличить время между повторными наблюдениями одной и той же площадки до суток и более.

На рис. 7 представлены кадры, совмещенные для серии наблюдений, где последовательными точками отмечены положения МП Auriga-94 за одну ночь. Опорные звезды выделены кружком и номером. Также представлено движение МП Auriga-94 за весь период наблюдений, указанный в табл. 1. В этом случае наблюдения ограничены шестнадцатью средними положениями МП для моментов времени, значения которых приведены в табл. 1.

Согласно этим измерениям, было промоделировано движение МП на фоне опорных звезд, а также положения телескопа в моменты измерения.

Заключение

Рассмотренные методы моделирования процесса наблюдения малых планет и АСЗ позволяют использовать реальные данные в виртуальной модели и выявлять неточности измерений. В совокупности с моделью, реальные телескопы могут стать мощным инструментом при наблюдении малых планет и АСЗ, позволят ускорить процесс наведения на объект, а также адаптировать процесс наблюдений под реальные условия. Моделирование процесса наблюдений способствует созданию методической базы, необходимой для изучения процесса взаимодействия астронома с телескопом.

Авторы искренне признательны директору Астрономической Обсерватории г. Николаева (Украина) профессору Геннадию Ивановичу Пинигину за оказанную помощь при подготовке статьи, а также выражают надежду на то, что виртуальный телескоп и дальнейшие трехмерные построения будут практически полезны исследователям космического пространства.

Литература

1. **Yearbook of Astronomy 2004** // Pan Macmillan, 2003 – P. 318
2. **Абросимов В. М., Ковальчук А. Н., Малевинский С. В.** и др. Изучение объектов в ближнем космосе с помощью телескопа АЗТ-8, оснащенного ПЗС-камерой // Космічна наука і технологія. – 2004. – Т. 10. – № 1. – С. 79–84.
3. **Жаров В. Е.** Сферическая астрономия (<http://astronet.ru/db/msg/1190894/index.html>)
4. **Кононович Э. В., Мороз В. И.** Общий курс астрономии. – М.: Едиториал УРСС, 2001. – 544 с.
5. **Львов В. Н., Смахачева Р. И., Цекмейстер С. Д.** ЭПОС. Пакет программ для решения эфемеридных задач, связанных с объектами Солнечной системы. Руководство пользователя. Версия 3. 1999–2003. – СПб.: ГАО РАН, Пулковое. – С. 32.
6. **Пинигин Г. И.** Телескопы наземной оптической астрометрии. Учебн. пособ. – Николаев: Атол, 2000. – 104 с.
7. **Цекмейстер С. Д.** Новые возможности программной системы EPOS // Известия ГАО. – № 214. Астрометрия и небесная механика. СПб., 2000. – С. 469–478.
8. **Шергин В., Максимова В.** Алгоритм работы управляющего вычислительного комплекса БТА. Специальная астрофизическая обсерватория Российской академии наук (http://serv.sao.ru/hq/sekbta/Modem/bta_control/node1.html)
9. **Alekseev K., Pinigin G., Reshetnikova N.** 3D Interactive Model of Observational Process of the Minor Planet Iris (7) / Research of Artificial and Natural NEOs and Other Solar System Bodies with CCD Ground-based Telescopes. Proceedings of the Conference, May 17–20, 2004, Nikolaev. – Atol, – 2004. – P. 13–14.
10. **Manual for Asteroid Catcher B-612** // Japan Spaceguard Association. – Tokyo, Japan, 2000. – P. 1–50. – CD-ROM.
11. **Besarab V., Kovalchuk A., Mazhev A.** et al., Current state of the Fast robotic Telescope // Research of Artificial and Natural NEOs and Other Solar System Bodies with CCD Ground-based Telescopes. Proceedings of the Conference, May 17–20, 2004, Nikolaev. – Atol, 2004. – P. 20–21.
12. **Львов В. Н., Смахачева Р. И., Цекмейстер С. Д.** EPOS software package, 1999–2004 by the Central Astronomical Observatory at Pulkovo. Saint Petersburg, Russia.
13. **Carey R., Bell G., Marrin C.**, ISO/IEC 14772-1:1997, Virtual Reality Modeling Language (VRML97), 1997. The VRML Consortium Incorporated. (<http://www.vrml.org/Specifications/VRML97/copyright.html>)

В. Ф. Михайлов, Т. Н. Нарытник, И. В. Брагин, В. Н. Мошкин.

Микроволновые технологии в телекоммуникационных системах: Учеб. пособие / СПбГУАП. СПб., 2003. – 337 с.: ил. ISBN 5-8088-0092-7

Приводятся и обсуждаются сведения о распространении радиоволн микроволнового диапазона, а также типы и характеристики линий передач этого диапазона. Рассматриваются методы формирования сигналов телевидения и звукового вещания, микроволновые телерадиоинформационные сети. Обсуждаются системы Интернет-доступа, включая доступ по телефонной сети к кабельному телевидению, спутниковым каналам и телерадиоинформационным сетям. Анализируется оборудование микроволновых телерадиоинформационных распределительных сетей и интегрированные информационные сети на их основе.

Пособие предназначено для студентов радиотехнических специальностей.

