

БОКЗ-М60. При использовании этих ДУС прибор становится равноточным относительно оптических и инерциальных измерений. При этом повышается эффективность совместной фильтрации измерений с обоих каналов и прогнозирования кинематических параметров движения КА. Совместная обработка показаний прибора, во-первых, повышает точность измерений, а во-вторых, позволяет формировать выходную информацию с частотой и задержками по времени, достаточными для прямого управления КА. Кроме того, новый прибор будет содержать приемно-вычислительное устройство сигналов навигационных спутников ГЛОНАСС/GPS, что позволит вычислять все параметры орбитального движения КА. Такой прибор способен заменить кинематический контур КА, обладая при этом массой до 5 кг, что, конечно, выгодно с точки зрения показателей габаритно-массовых, надежности и стоимости.

#### СИСТЕМА ДАТЧИКОВ ГИДА ТЕЛЕСКОПА Т-170М

*Г.А. Аванесов, С.В. Воронков, Я.Л. Зиман,  
В.А. Красиков, М.Ю. Куделин, А.А. Фориш*

Институт космических исследований  
Российской академии наук, Москва

Рассмотрена концепция построения системы датчиков гида, предназначенной для использования в контуре управления космического аппарата «Спектр-УФ» при наведении телескопа Т-170М на объект наблюдения. Обоснован выбор типа и модели ПЗС-матрицы, являющейся фоточувствительным элементом датчика гида. Приведены результаты моделирования перемещения изображений звезд в поле зрения датчика гида, и оценена достижимая точность вычисления координат изображений звезд на ПЗС.

A concept of the guide system design is considered. The system would be used in the Spectr-UF s/c control circuit for pointing the T-170M telescope to the observation object. Choice of the type and the model of the guide's sensor photosensitive element (CCD array) is grounded. Results of simulating a star image displacement in the guide sensor's field of view are presented. The achievable accuracy of calculating coordinates of the star images on the CCD-array is estimated.

#### Введение

К числу международных космических проектов, в которых участвует институт космических исследований российской академии наук (ИКИ РАН), относится создание космической международной астрофизической обсерватории, предназначенной для исследования космического пространства в ультрафиолетовом диапазоне длин волн с высоким угловым разрешением. Обсерватория строится на базе космического аппарата (КА) «Спектр-УФ», в состав бортовой аппаратуры которого входит телескоп Т-170М, обеспечивающий достижение основных научных целей проекта.

Решение поставленных перед обсерваторией задач возможно при условии наведения телескопа на наблюдаемый объект с высокой точностью и удержания его в заданном положении в течение достаточно длительных интервалов времени. Для этого в телескопе планируется использовать разрабатываемую в ИКИ РАН систему датчиков гида (СДГ).

В настоящей статье описаны система датчиков гида и состояние ее разработки на текущий момент.

### 1. Общие сведения о проекте

Для решения основных задач обсерватории в состав телескопа Т-170М входят два спектрометра высокого разрешения и один длиннощелевой спектрометр, предназначенные для регистрации источников излучения в диапазоне длин волн от 102 до 310 нм. Максимальная длительность непрерывной экспозиции при наблюдениях на спектрографах составляет до 30 ч; средняя длительность экспозиции — 1 ч. В течение экспозиции изображение исследуемого источника не должно выходить за границы входной щелевой диафрагмы соответствующего спектрометра, угловой размер которой составляет около 1 угл.с. При фокусном расстоянии телескопа 17 м ожидаемый угловой размер исследуемого объекта в фокальной плоскости телескопа составит примерно 0,4 угл.с. Наведение телескопа на требуемый объект должно быть выполнено с точностью  $\pm 0,25$  угл.с.

Помимо спектрометров в состав телескопа входит также блок камер поля, позволяющих получать изображения небесной сферы как в инфракрасном, так и видимом диапазоне длин волн. Максимальная длительность непрерывной экспозиции камер составляет 1 ч, размер элемента камеры поля равен 0,16 угл.с. Для получения достаточного качества изображения необходимо на интервале экспонирования обеспечить стабилизацию изображения со среднеквадратическим отклонением — по каналам тангажа и рыскания не более 0,08 угл.с и в канале вращения 40 угл.с.

Таким образом, среднеквадратическая погрешность наведения и стабилизации космического аппарата относительно заданной точки на небесной сфере с использованием в системе управления космического аппарата (СУ КА) информации системы датчиков гида не должна превышать 0,08 угл.с.

Для обеспечения этих условий процедура наведения и стабилизации телескопа в заданную область пространства будет осуществляться СУ КА с использованием датчиков ориентации и электромаховичных исполнительных органов в двух контурах управления: первичном и вторичном.

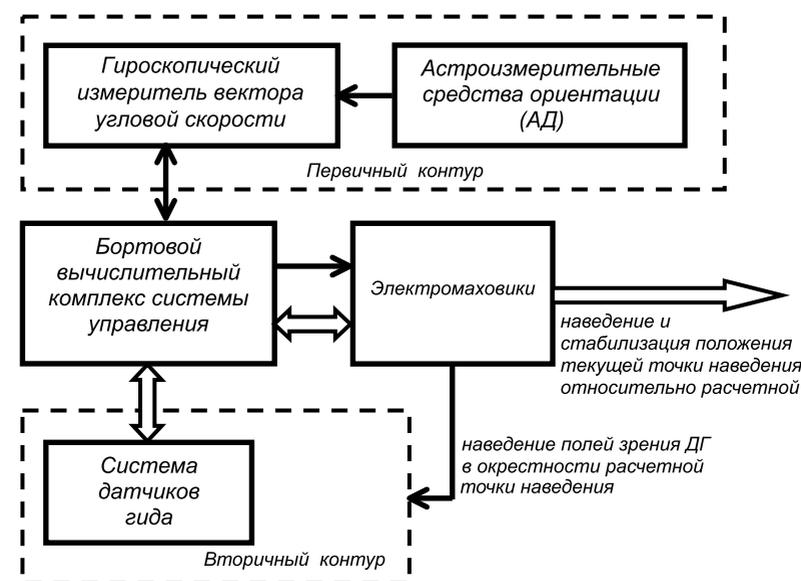


Рис. 1. Схема наведения телескопа на объект наблюдения

Схема наведения телескопа Т-170М двумя управляющими контурами представлена на рис. 1.

В первичном контуре обеспечивается наведение приборной системы координат (ПСК) системы управления КА в заданное положение инерциального пространства и угловая стабилизация ПСК в этом положении. При этом используется информация собственных измерительных приборов системы управления (астродатчиков — АД и гироскопического измерителя вектора угловой скорости — ГИВУС). Бортовой вычислительный комплекс системы управления (БВК) реализует непрерывный вычислительный процесс обработки получаемой от ГИВУС информации и для каждого такта управления формирует кватернион текущей ориентации осей базовой системы координат КА в инерциальном пространстве. Информация от астродатчиков используется БВК для коррекции кватерниона текущей ориентации космического аппарата, рассчитываемого по информации ГИВУС. Конечной задачей первичного контура является наведение

полей зрения работающих в данном сеансе наблюдений датчиков гида (ДГ) в область небесной сферы, содержащей гидирующие звезды, заданные в рабочем каталоге для конкретной расчетной точки наведения (точки на небесной сфере с координатами объекта наблюдения). Погрешность наведения первичным контуром достаточно велика, что обусловлено ограниченными возможностями астродатчиков и ГИВУС.

Для наведения телескопа в окрестности расчетной точки с требуемой точностью используется вторичный контур управления. В этом режиме работы система управления КА вместо данных собственных измерительных приборов использует информацию системы датчиков гида, представляющей собой разновидность астродатчика. При работе СДГ для каждой точки наблюдения составляется на Земле и передается на борт КА рабочий каталог звезд. Каталог формируется таким образом, чтобы при совмещении изображений звезд с соответствующими «каталожными» звездами расчетная точка наведения совпадала с заданной точкой научного прибора (например, с центром входной щели спектрометра). СДГ проводит сравнение зарегистрированных на изображении координат звезд с рабочим каталогом и выдает в систему управления информацию об отклонении текущего положения от расчетного, т. е. информацию об ошибке наведения. Таким образом, система управления КА при работе вторичного контура использует прямую информацию об отклонении конфигурации изображений участка звездного неба от каталожной конфигурации и стабилизирует тем самым положение заданной точки научного прибора относительно расчетной точки наблюдения с высокой точностью.

Для достижения требуемой точности привязки положения щели спектрометра к системе координат СДГ необходимо, чтобы обеспечивалась стабильность геометрии расположения датчиков гида и входных щелей спектрометров и не допускался их взаимный уход более чем на 0,03 угл.с на продолжительных интервалах между юстировочными сеансами. Выполнение такого условия возможно при расположении чувствительных элементов СДГ как можно ближе к щелям спектрометров, что позволит избежать температурных

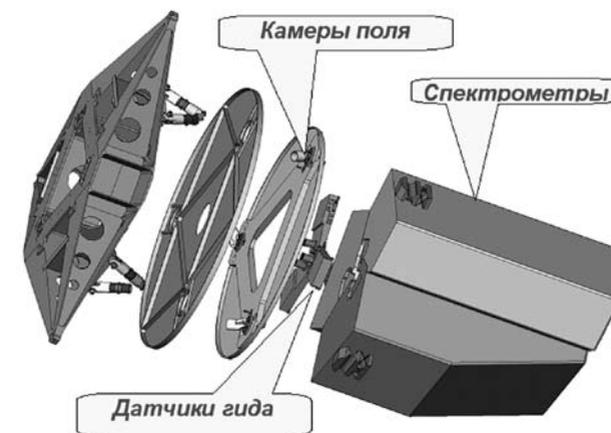


Рис. 2. Схема расположения аппаратуры в инструментальном отсеке телескопа

деформаций при эксплуатации. Сложность такого размещения заключается в ограниченном объеме инструментального отсека телескопа и ограничениях на тепловыделение приборов, окружающих спектрометры. Единственно возможным решением в данном случае является разделение оптической и вычислительной частей системы датчиков гида. При этом на каждый из спектрометров будет установлен свой собственный датчик гида (рис. 2), имеющий в своем составе ПЗС-матрицу и электронные компоненты, необходимые для получения, оцифровки и передачи изображения звездного неба в так называемый блок обработки данных (БОД). БОД, установленный за пределами инструментального отсека телескопа на расстоянии нескольких метров от датчиков гида, предназначен для управления датчиками, сбора от них данных и передачи информации в БВК.

## 2. Выбор светоприемника

В предложенной схеме построения СДГ в качестве оптической системы, формирующей изображение на светоприемниках датчиков гида, будет использоваться объектив телескопа Т-170М. За разработчиками СДГ остается выбор типа

и модели светоприемника, характеристики которого будут обуславливать размер поля зрения каждого из датчиков гида, их чувствительность к звездной величине, уровень энергопотребления и т. д. В связи с этим выбор светоприемника является одной из ключевых задач на этапе проектирования, от решения которой зависит успех всей разработки. Одним из основных вопросов является выбор формата светоприемника, определяющего размер поля зрения датчика гида. Для успешного решения целевой задачи СДГ необходимо, чтобы в поле зрения одного датчика гида находилось не менее четырех звезд в режиме распознавания гидирующих звезд и не менее одной звезды в режиме слежения за гидирующими звездами. Основными факторами, обуславливающими число зарегистрированных на кадре звезд, являются чувствительность датчика гида и размер его поля зрения. Проведенные исследования и опыт ИКИ РАН в разработке приборов астроориентации позволяют утверждать, что датчики гида будут способны регистрировать звезды со звездными величинами до 17-18-й. На рис. 3 представлены зависимости числа звезд в поле зрения одного ДГ  $\sim 2 \times 2$  угл.мин от визуальной звездной величины для различных галактических широт. На рис. 4 представлены аналогичные зависимости для варианта, соответствующего полю зрения датчика гида  $\sim 3 \times 3$  угл.мин.

Как следует из графиков, в поле зрения размером  $2 \times 2$  угл.мин будут попадать в лучшем случае две звезды звездной величины  $m_v = 17$ , и для обеспечения требуемого числа звезд в поле зрения каждого датчика гида необходимо, чтобы система была способна регистрировать звезды, по крайней мере, 18-й звездной величины. В настоящее время не существует надежных звездных каталогов, охватывающих всю небесную сферу и содержащих звезды до 18-й визуальной звездной величины включительно. Поэтому при разработке СДГ ставилась задача обеспечения для каждого датчика гида поля зрения размером не менее  $3 \times 3$  угл.мин, что достигается выбором светоприемника соответствующего формата. При фокусном расстоянии телескопа, равном 17 м, ПЗС-матрица должна иметь размер по горизонтали и вертикали около 15 мм для обеспечения требуемого угла поля зрения. Наиболее перспективным представлялось ис-

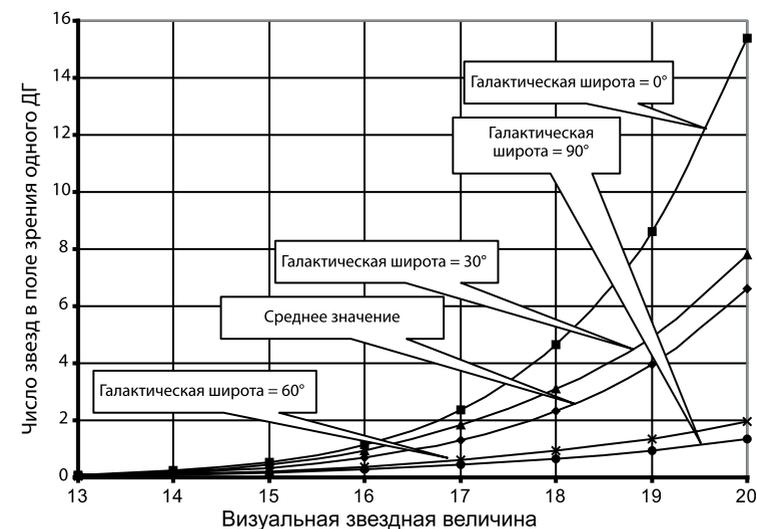


Рис. 3. Зависимость числа звезд в поле зрения размером  $2 \times 2$  угл.мин от звездной величины

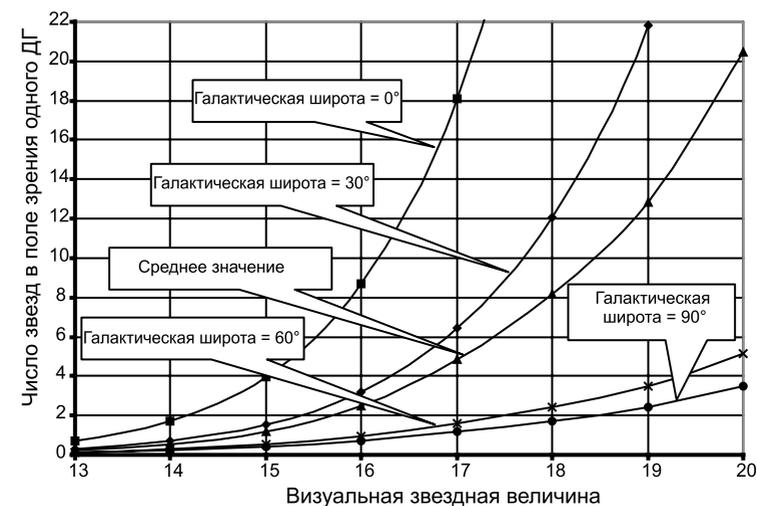


Рис. 4. Зависимость числа звезд в поле зрения размером  $3 \times 3$  угл.мин от звездной величины

пользование КМОП-матрицы STAR-1000, едва ли не единственной матрицы космического применения подобного типа. Матрица имеет формат  $1024 \times 1024$  элемента и при размере элемента, равном 15 мкм, удовлетворяет требованию к обеспечению поля зрения  $3 \times 3$  угл. мин. Основными достоинствами матрицы STAR-1000 являются наличие встроенного усилителя и аналого-цифрового преобразователя, возможность поэлементной адресации при считывании изображения, высокий уровень стойкости к ионизирующему излучению. Использование матрицы STAR-1000 в датчике гида позволяло минимизировать его габариты и энергопотребление и повысить быстродействие системы за счет уменьшения объема обрабатываемой информации в режиме адресного обращения к элементам матрицы, содержащим изображение гидирующих звезд. К сожалению, при проведении лабораторных испытаний такой матрицы выяснилось, что уровень ее чувствительности не позволит регистрировать в составе СДГ звезды до 17-й звездной величины включительно с требуемым соотношением сигнал/шум. Кроме того, проведенные испытания STAR-1000 на протонном ускорителе показали, что воздействие протонов на матрицу приводит к образованию на ней большого количества дефектов, наличие которых на изображениях звездного неба затрудняет идентификацию зарегистрированных звезд. Поэтому в качестве приемников излучения в датчиках гида должны быть использованы ПЗС-матрицы, что несколько усложняет задачу разработчиков СДГ. Как уже говорилось, компоновщики инструментального отсека телескопа совместно с разработчиками камер поля и спектрометров предъявляют жесткие требования к габаритам датчика гида и к его тепловыделению. В отличие от варианта использования КМОП-матрицы, датчик гида на ПЗС-матрице требует разработки более сложного видеотракта, наличия большего количества каналов питания и информационного обмена. Все это приводит к увеличению габаритов и тепловыделения датчика гида. В результате длительной проработки различных решений был выбран устраивающий все заинтересованные стороны вариант построения системы датчиков гида, структурная схема которого представлена на рис. 5.

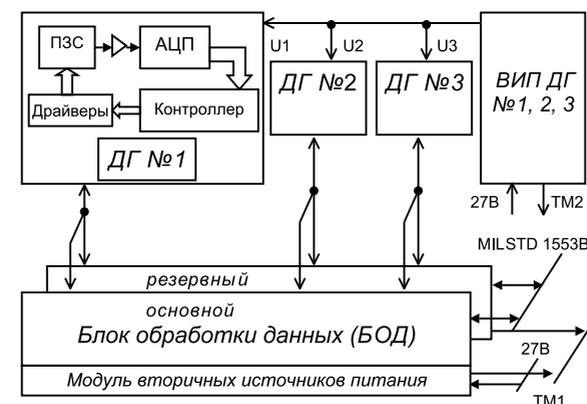


Рис. 5. Структурная схема системы датчиков гида

В соответствии с представленной схемой, в состав каждого из датчиков гида будет входить плата видеотракта, содержащая ПЗС-матрицу, аналого-цифровой преобразователь и ряд микросхем для управления режимами работы ПЗС-матрицы. Питание ДГ будет осуществляться от модуля вторичных источников питания ДГ (ВИП ДГ), расположенного вне инструментального отсека телескопа и удаленного от датчиков гида на несколько метров. Разделение модуля видеотракта ДГ и модуля ВИП ДГ позволит уменьшить габаритные размеры конструкции датчика гида, устанавливаемого на спектрометр, а главное, позволит существенно уменьшить тепловыделение датчика гида. К основным задачам расположенного вне инструментального отсека блока обработки данных относятся следующие: управление работой СДГ, прием от датчиков гида изображений звездного неба, обработка и увязка полученных данных, передача данных в бортовой вычислительный комплекс, хранение программ в памяти. Блок обработки данных будет выполнен в виде двухпроцессорного резервированного устройства с собственным источником электропитания. Для подключения к БВК с целью получения управляющих кодовых команд, а также передачи пакета данных об ориентации Т-170 в БОД применен дублированный последовательный интерфейс по ГОСТ Р52070-2003 (MIL-STD-1553B).

Представленная схема может быть реализована как на базе ПЗС-матрицы форматом  $1024 \times 1024$  элемента, так и ПЗС-матрицы форматом  $512 \times 512$  элементов. Руководствуясь критерием обеспечения требуемого размера поля зрения датчика гида, а также учитывая, что датчик гида на базе ПЗС-матрицы форматом  $1024 \times 1024$  элемента будет иметь большие габариты и увеличенное энергопотребление, принято следующее решение. В качестве светоприемников в датчиках гида должна использоваться ПЗС-матрица «Лев-3» (форматом  $512 \times 512$  элемента, с размером элемента  $16 \times 16$  мкм), аналогом которой является ПЗС-матрица «Лев-2», положительно зарекомендовавшая себя в течение почти десятилетней эксплуатации в составе множества звездных датчиков семейства БОКЗ и БОКЗ-М. В силу того, что поле зрения датчика гида, имеющего в своем составе ПЗС-матрицу «Лев-3», будет составлять  $\sim 1,6 \times 1,6$  угл.мин, в состав датчика гида войдет специальный оптический элемент, через который будет проходить падающий на матрицу световой пучок, что позволит расширить поле зрения ДГ до требуемого размера  $\sim 3 \times 3$  угл.мин.

### 3. Моделирование перемещений изображений звезд по ПЗС-матрице

Для варианта построения СДГ, подразумевающего использование малогабаритной матрицы совместно с оптическим элементом, было выполнено моделирование, целью которого являлось получение оценки точности вычисления координат изображений звезд на ПЗС-матрицах датчиков гида. Моделирование проводилось для худшего случая, когда СДГ будет вынуждена работать на пределе чувствительности по звездам с  $m_v = 17,0$ , от которых за одну секунду приходит  $\sim 1500$  фотоэлектронов. На первом этапе моделирования были рассчитаны с шагом  $0,5$  мкм распределения освещенности в оптических изображениях шести звезд, расположенных на ПЗС-матрице в соответствии с рис. 6. Смоделированные изображения распределения освещенности в шести оптических изображениях одинаковых по блеску звезд, расположенных в разных частях поля зрения ДГ, приведены на рис. 7(a–e).

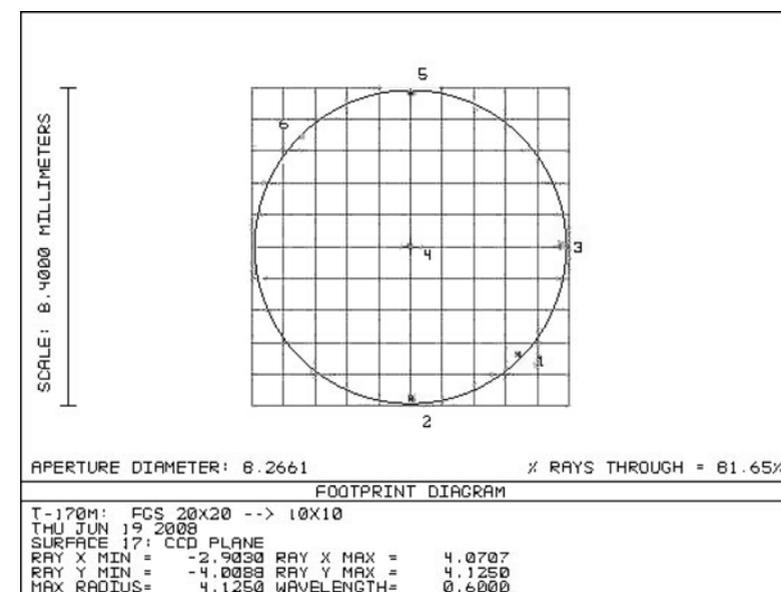


Рис. 6. Расположение исследуемых звезд в поле зрения датчика гида

После получения смоделированных изображений была проведена процедура их обработки, в процессе которой выполнялось интегрирование изображения размером  $128 \times 128$  мкм в пределах элемента ПЗС-матрицы размером  $16 \times 16$  мкм. При этом вычислялось количество электронов в каждом занятом изображением звезды элементе ПЗС-матрицы с учетом данных о распределении освещенности в пятне от звезды и общего количества пришедших от звезды фотоэлектронов. На следующем шаге моделировалась процедура аналого-цифрового преобразования с шагом квантования 20 фотоэлектронов, и полученное таким образом цифровое представление изображения на ПЗС-матрице использовалось для вычисления координат энергетического центра изображения звезды. После этого моделировалось перемещение изображения звезды по растру ПЗС-матрицы на  $0,5$  мкм, и процедура обработки продолжалась аналогичным образом до вычисления координат энергетического центра.

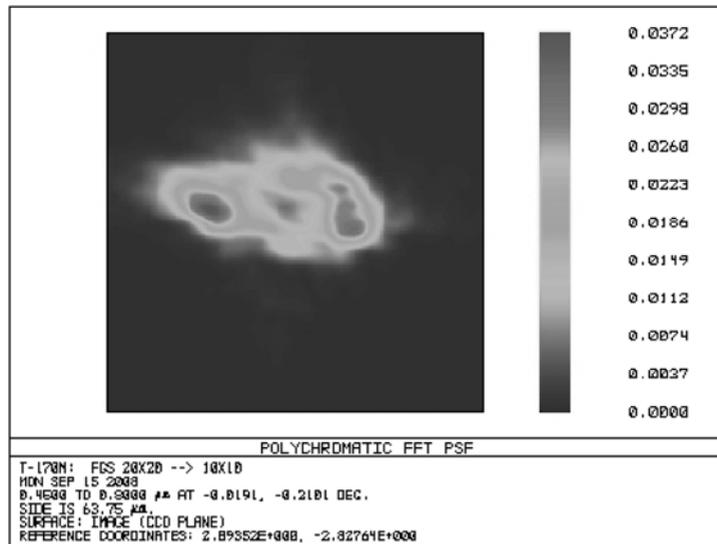


Рис. 7а. Изображение звезды №1

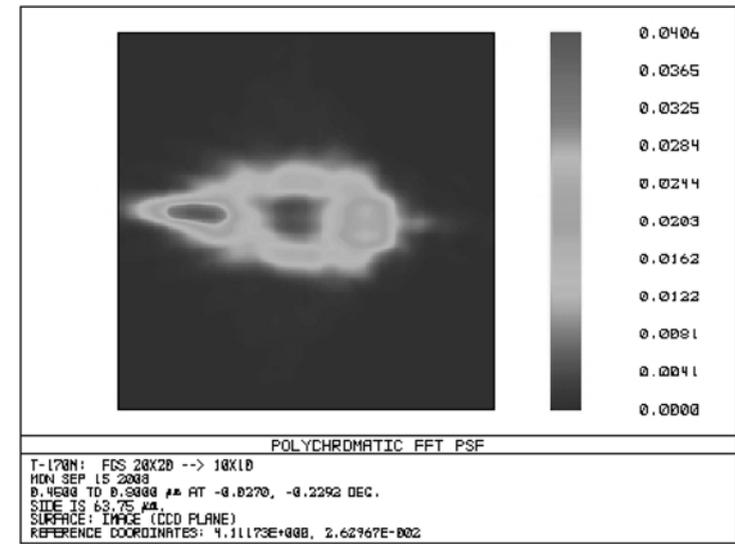


Рис. 7б. Изображение звезды №3

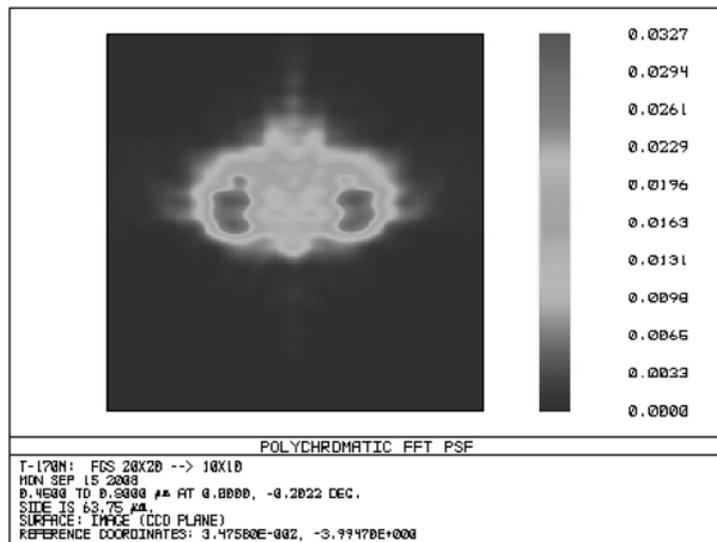


Рис. 7б. Изображение звезды №2

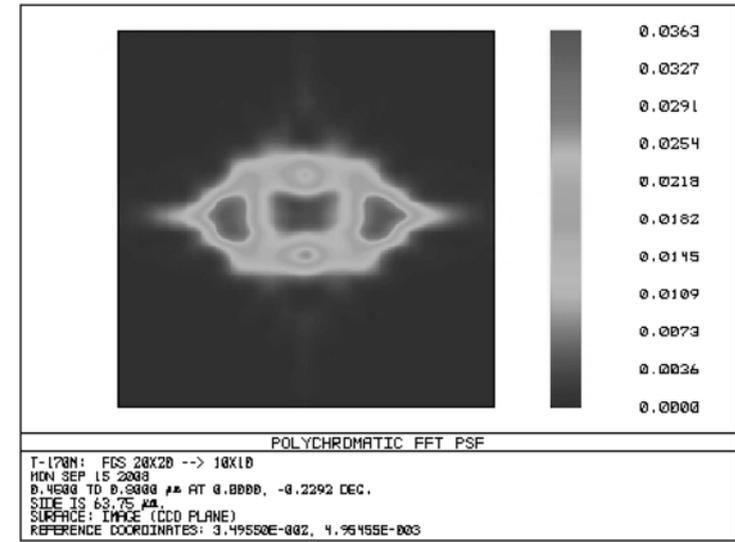


Рис. 7г. Изображение звезды №4

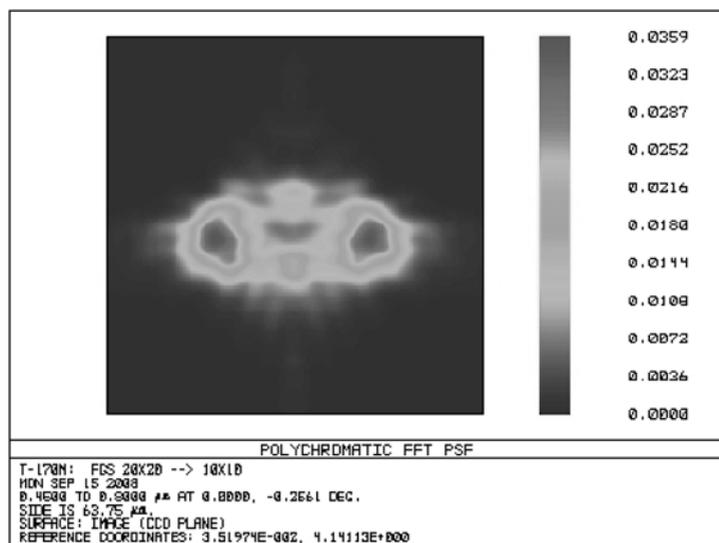


Рис. 7д. Изображение звезды №5

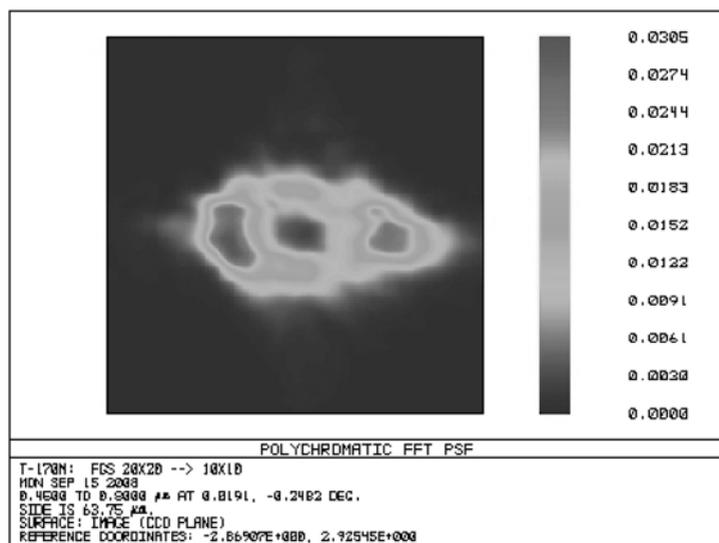


Рис. 7е. Изображение звезды №6

Вычислялись величины смещений по координатам  $x$  и  $y$  и сравнивались с эталонной величиной смещения. Процедура перемещения изображения звезды выполнялась в пределах элемента ПЗС-матрицы (16 мкм) с шагом 0,5 мкм по каждой координате, и по уклонениям зарегистрированных величин смещения от эталонных вычислялась величина среднеквадратической ошибки определения смещения. Значения среднеквадратических ошибок для звезды 17-й звездной величины составили около 0,01 угл.с.

Кроме того, в процессе обработки была оценена величина среднеквадратической ошибки определения абсолютных значений координат. В данном случае величина ошибки обусловлена влиянием ошибок дискретизации (ошибка аналого-цифрового преобразования) и «методической» ошибки. Собственные шумы прибора и фотонный шум источников излучения не учитывались. Как следует из полученных результатов, для шести звезд в поле зрения ДГ величины среднеквадратических ошибок определения абсолютных значений координат для звезды  $m_v = 17,0$  не превышали 0,02 угл.с.

Как следует из результатов моделирования, предложенный вариант реализации системы датчиков гида позволяет добиться приемлемых точностей при решении задачи наведения телескопа Т-170М и слежения за гидирующими звездами при проведении научных экспериментов.

### Заключение

Предложенная ИКИ РАН концепция построения системы датчиков гида телескопа Т-170М позволяет создать прибор, соответствующий требованиям технического задания и способный обеспечить условия для проведения всех необходимых наблюдений на телескопе Т-170М. В настоящее время изготавливается лабораторный образец СДГ, экспериментальная отработка которого намечена на 2009 г. К числу запланированных работ относится проведение испытаний макета СДГ в составе телескопов Цейс-2000 (Терскол) и Цейс-600 (Звенигород). На основе анализа результатов экспериментальных работ с макетом будут уточнены ожидаемые характеристики системы датчиков гида.