

**В.И. ФЕДОСЕЕВ
М.П. КОЛОСОВ**

**ОПТИКО-
ЭЛЕКТРОННЫЕ
ПРИБОРЫ
ОРИЕНТАЦИИ
И НАВИГАЦИИ
КОСМИЧЕСКИХ
АППАРАТОВ**



В.И. Федосеев
М.П. Колосов

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением
по образованию в области приборостроения и оптоэлектроники
в качестве учебного пособия для студентов высших учебных
заведений, обучающихся по направлению «Оптехника»
и специальности «Оптико-электронные приборы и системы»*



Москва
Логос
2007

УДК 621.384.31
ББК 32.84
Ф 32

Рецензент

Ю.Г. Якушенков, доктор технических наук, профессор

Федосеев В.И., Колосов М.П.

Ф32 **Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов: учеб. пособие. — М.: Логос, 2007. — 248 с.: ил.**
ISBN 978-5-98699-052-1

Рассмотрены оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов как устройства переработки информации и как оптические устройства. Проанализированы основные типы звездных, земных и солнечных астроприборов, особенности их проектирования, а также методы обеспечения точности и помехозащищенности этих приборов. Изложены принципы построения наиболее важных образцов стендов для проведения точностных испытаний указанных приборов и имитаторов астроориентиров и оптических помех.

Для студентов высших учебных заведений, получающих образование по направлению «Оптотехника» и специальности «Оптико-электронные приборы и системы». Представляет интерес для ученых и специалистов, работающих в области оптического приборостроения и проектирования космических аппаратов.

УДК 621.384.31
ББК 32.84

ISBN 978-5-98699-052-1

© Федосеев В.И., Колосов, М.П. 2007
© Логос, 2007

ПРЕДИСЛОВИЕ

4 октября 1957 г. был запущен первый искусственный спутник Земли и началась космическая эра. С тех пор использование космической техники для практических нужд и научных исследований постоянно расширялось и продолжает расширяться. За пять десятилетий космической эры проектирование и производство космической техники превратилось в самостоятельную отрасль промышленности, в которой работают тысячи специалистов и которая содержит множество технических направлений. Одним из таких технических направлений является космическое оптическое приборостроение и, в частности, создание оптико-электронных приборов ориентации и навигации космических аппаратов (КА).

Приборы ориентации и навигации КА являются оптическими устройствами и одновременно устройствами переработки информации, причем объем этой переработки достаточно велик. Это приводит к определенным особенностям их проектирования. Предлагаемая книга посвящена специфическим особенностям проектирования, присущим только оптико-электронным приборам ориентации и навигации КА.

При написании книги авторы исходили из того, что читатель имеет представление об основах проектирования оптико-электронных приборов (ОЭП). Поэтому здесь не приводятся типовые этапы проектирования рассматриваемых приборов (такие, как энергетический расчет, расчет погрешностей и т.д.). Эти сведения подробно описаны в литературе, посвященной проектированию ОЭП, например в [55, 70].

Эта книга создана авторами, много лет работающими в НПП «Геофизика-Космос», являющемся правопреемником приборостроительного НПО «Геофизика», история которого насчитывает более 150 лет.

Книга в основном базируется на теоретических исследованиях и практическом опыте авторов, полученном при проектировании многочисленных оптико-электронных приборов ориентации и навигации КА, а также стендов и имитаторов, созданных и создаваемых на указанном предприятии. При описании конструкций конкретных приборов, стендов и имитаторов (гл. 4–6) авторы пользовались некоторыми не публиковавшимися ранее материалами, имеющимися на предприятии. В книге также широко используются доступные отечественные и зарубежные литературные источники.

Из опубликованных ранее книг по данной тематике к настоящей публикации наиболее близки работы [16, 17], а также работа [24], в которой освещен ряд системных аспектов проектирования астросистем. Эти книги изданы несколько десятилетий назад. Большинство приборов, которые представлены в предлагаемой книге, описаны в энциклопедии [45], где приведены их основные характеристики и фотографии. Поэтому настоящую книгу следует рассматривать как логическое продолжение этих работ.

Книга содержит шесть глав. В главе 1 приводятся общие сведения об ОЭП ориентации и навигации КА (астоприборах). Задачи, которые решаются с помощью этих приборов, сводятся к четырем основным:

астроориентации, астрокоррекции, астронавигации и определения положения (индикации) осей КА. Приводятся основные типы астроприборов (приборы, работающие по звездам, Земле и Солнцу), а также оптические помехи указанных приборов: боковые, фоновые и точечные. В главе 2 астроприборы рассматриваются как устройства переработки информации, формулируются основные правила проектирования этих приборов: правило разделения режимов работы, правило соответствия пространственно-временной обработки и цели режима и правило относительного измерения, описывается организация режимов работы рассматриваемых приборов: режимов калибровки, поиска, селекции рабочего источника и измерений. В главе 3 приводятся оптические методы обеспечения указанных режимов. Режим калибровки астроприборов и реализация в них правила относительного измерения обеспечивается нерасстраиваемыми и самокалибрующимися оптическими системами. Для обеспечения помехозащищенности астроприборов в режиме поиска широко используются разнообразные оптические методы борьбы со световыми помехами. Особенно наглядно это проявляется при подавлении боковых помех в звездных приборах. Для оптимизации режима поиска в системе солнечно-звездной ориентации применяются двухканальные оптические системы, в которых используется априорная информация о положении рабочей звезды относительно Солнца. Реализация режима селекции светящихся частиц также влияет на формирование оптической системы астроориентира. Режим измерения в звездных приборах с многоэлементными приемниками излучения предъявляет специфические требования при расчете их объективов.

В главе 4 описаны основные типы звездных, земных и солнечных ОЭП ориентации и навигации КА, как относительно старые приборы, которые использовались на таких известных КА, как «Космос», «Союз», «Салют», «Буран» и т. д., так и самые современные («Ямал», «Глонасс»).

В главе 5 изложены подходы к построению основных типов наиболее сложных стендов для проведения точностных испытаний астроприборов. В главе 6 кратко представлены современные универсальные и специализированные имитаторы астроориентиров и оптических помех ОЭП ориентации и навигации КА. Приведены основные технические характеристики имитаторов и пояснен их принцип действия.

В заключении показаны направления развития современных ОЭП ориентации и навигации КА.

Авторы признательны проф., докт. техн. наук Ю.Г. Якушенкову за ценные замечания и предложения, способствующие улучшению содержания настоящей книги.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АД	— амплитудный детектор
АК	— автоколлиматор
АПЧ	— автоподстройка чувствительности
АРУ	— автоматическая регулировка усиления
БПС	— блок подавления помехи от Солнца
ВКГЭ	— внешний канал геометрического эталона
ГОН	— генератор опорного напряжения
ГПО	— газопылевое окружение
ДЗ	— датчик засветки
ДНЗ	— датчик наличия Земли
ДНС-Г	— датчик направления на Солнце (грубый)
ДНС-Т	— датчик направления на Солнце (точный)
ДУ	— датчик угла
ЗПС	— зеркально-призменная система
ИЗАК	— имитатор Земля–атмосфера–космос
ИК	— инфракрасный
КА	— космический аппарат
КГЭ	— канал геометрического эталона
ЛК	— левый край
МБМ	— микроболометрическая матрица
МЭМС	— микроэлектромеханические системы
НЗ	— сигнал наличия Земли
НК	— направляющий косинус
НС	— сигнал наличия Солнца
ОГ	— оптическая головка
ОМ	— опорная метка
ОШ	— оптический шарнир
ОЭП	— оптико-электронный прибор
ПЗС	— прибор с зарядовой связью
ПК	— правый край;
ПЛЭ	— приемник лучистой энергии
ПМВ	— построитель местной вертикали
ПОЗ	— прибор ориентации по Земле
ПОС	— прибор ориентации по Солнцу
ПУ	— пороговое устройство
ПП	— положение рамок подвеса
РЛИ	— радиоломинесцентный излучатель
РУ	— резонансный усилитель
СВА	— собственная внешняя атмосфера
СЗК	— светозащитная крышка

СД	— светодиод
СИ	— счетные импульсы
СК	— система координат
СКО	— среднее квадратическое отклонение
СУ	— система управления
ТМ	— телеметрический
Тр	— траектория
ФД	— фазочувствительный детектор, фотодиод
ФОС	— фокусирующая отклоняющая система
ФРТ	— функция распределения освещенности точки (звезды)
ФЭП	— фотоэлектрический преобразователь
ФЭУ	— фотоэлектронный умножитель
ЦАП	— цифроаналоговый преобразователь
ШД	— шаговый двигатель
ШИМ	— широтно-импульсная модуляция
ЭВМ	— электронно-вычислительная машина
ЭКОС	— элементарная концентрическая оптическая система
ЭРИ	— электрорадиоизделие

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

1.1. Задачи, решаемые ОЭП ориентации и навигации на КА

Развитие космической техники во многом связано с совершенствованием систем управления КА. В связи с высокими и постоянно возрастающими требованиями к точности таких систем, с необходимостью обеспечения автономности их функционирования в качестве датчиков первичной информации используются оптико-электронные приборы (астроприборы), определяющие угловое положение аппарата относительно астрономических источников излучения (астроориентиров) — звезд, Солнца, планет (в том числе Земли). Эти приборы на современных КА могут обеспечивать в составе системы управления решение четырех основных задач — астроориентации, астрокоррекции, астронавигации и определения положения (индикации) осей КА [37].

Задача астроориентации состоит в том, чтобы по показаниям астроприборов ориентировать КА (или какое-либо устройство на КА, например телескоп, солнечные батареи) в инерциальном пространстве для выполнения того или иного эксперимента, измерения, маневра; при этом астроприборы непосредственно входят в контур управления КА и должны функционировать в течение всего времени поддержания режима ориентации.

В задаче астрокоррекции показания астроприборов используются для коррекции положения осей КА или осей его гиролатформы (реальной или виртуальной, реализованной программными средствами в бортовом компьютере), которые предварительно были соориентированы, но с течением времени их положение изменилось. В отличие от предыдущего случая астроприборы здесь не входят непосредственно в контур управления системы ориентации КА, а лишь периодически выдают корректирующую информацию. Поэтому время работы этих астроприборов при решении задачи астрокоррекции значительно меньше, чем при решении задачи астроориентации.

В задаче астронавигации показания астроприборов используются для определения параметров орбиты и местоположения КА

на орбите. Как известно [54], наиболее распространенный метод навигации в околоземном пространстве — измерение с КА в известный момент времени для двух астроориентиров углов между направлением на астроориентир и центр Земли и последующее вычисление параметров орбиты. В качестве астроориентиров могут выступать звезды и Солнце.

Задача индикации положения осей КА предполагает точное определение направления осей аппарата для «привязки» к инерциальной системе координат результатов измерения аппаратуры грубо ориентированного КА.

Для решения задачи астроориентации существуют типовые схемы — солнечно-звездная, солнечно-земная и звездно-земная. В солнечно-звездной схеме построение ориентации начинается с вращения КА вокруг некоторой оси, поиска Солнца соответствующим датчиком и последующей стабилизации одной из осей КА относительно направления на Солнце. Затем КА закручивается вокруг этой оси и осуществляет поиск заранее выбранной звезды, расположенной относительно Солнца под углом, близким к 90° . После обнаружения звезды система управления обеспечивает стабилизацию второй оси КА относительно направления на звезду. В результате одна ось КА оказывается «привязанной» к направлению на Солнце, вторая — к направлению на звезду. Аналогично этому обстоит дело в схеме солнечно-земной ориентации (с заменой звезды в предыдущей схеме на Землю) и в схеме звездно-земной ориентации (Земля используется в качестве первого ориентира). Для последнего случая следует отметить вариант звездно-земной ориентации, в котором звездой-ориентиром служит Полярная звезда. Такой вариант довольно часто используется для КА, находящихся на геостационарной орбите, поскольку направление на Полярную звезду близко к нормали к плоскости геостационарной орбиты.

Задача астроориентации возникает тогда, когда полностью отсутствует информация об ориентации осей КА: сразу после вывода КА на орбиту (построение начальной ориентации), когда КА начинает функционировать после длительного дежурного режима (например, при межпланетных полетах) или режима консервации, а также в аварийных режимах или при нештатных ситуациях. Поэтому построение начальной астроориентации жизненно необходимо для КА, но необходимость в этом возникает редко. Существенно более продолжительным может быть поддержание ориентации. В отличие от этого задача астрокоррекции на КА решается каждый раз, когда для выполнения целевой задачи требуется точное знание направления его осей, чтобы осуществить коррекцию положения базовой системы координат

КА. Такая необходимость может возникать весьма часто, периодичность этого определяется назначением того или иного КА, точностью инерциальных средств, участвующих в формировании базовой системы координат. Наиболее часто астрокоррекция проводится на высокоманевренных КА дистанционного зондирования Земли, где требуется высокая точность знания ориентации осей после часто повторяющихся сеансов переориентации или в процессе их проведения. Поэтому для астрокоррекции в отличие от астроориентации специфическими условиями работы астроприборов являются наличие предварительной информации об ориентации и необходимость оперативно выдавать информацию после получения соответствующей команды. Задача индикации положения возникает на КА тех типов, в которых используется грубая система ориентации (например, пассивная гравитационная система), а для целевой задачи требуется точная «привязка» результатов измерений целевой аппаратуры к инерциальной системе координат. Эта задача во многом аналогична задаче астрокоррекции, но в ней не требуется корректировки базовой системы координат КА. Результаты измерений астроприборов используются только при обработке данных целевых измерений.

В задачах астроориентации, астрокоррекции, индикации положения речь идет об установлении связей между системой координат КА и инерциальной системой координат, определяемой астроориентирами. В отличие от этого в задаче астронавигации необходимо определить местоположение КА на орбите и параметры орбиты, для чего не нужна «привязка» измерений астроприборов к направлению осей КА. Для определения навигационных параметров достаточно в известные моменты времени найти углы между направлением на центр Земли и направлениями на два других астроориентира (звезды, Солнце); такую процедуру необходимо проделать в нескольких точках орбиты (чем больше, тем выше точность определения навигационных параметров). Решая затем известные уравнения и выполняя фильтрацию [54], можно получить необходимую навигационную информацию. Особенности использования астроприборов в задаче астронавигации состоят, во-первых, в необходимости многократной выдачи информации на витке, фактически в реализации слежения за астроориентирами, и, во-вторых, в достаточности измерения углов между направлением на центр Земли и на ориентир без «привязки» к системе координат КА.

Рассмотренные задачи на любом КА решаются в условиях его естественного существования — на определенной космической орбите, по доступным для наблюдения астроориентирам, при наличии мешающих излучений различного рода, конструктивных

ограничений конкретного типа КА, его энергетических, динамических и других характеристик. С учетом всего этого к современным приборам ориентации и навигации КА предъявляется комплекс достаточно сложных технических требований, основными из которых являются:

- высокая точность угловых измерений;
- необходимая чувствительность — способность работать по излучению тех астроориентиров, которые обеспечивают проведение требуемых измерений;
- помехоустойчивость — устойчивость к воздействию различных помеховых излучений как естественного, так и искусственного происхождения;
- функционирование при различных движениях КА (работа на подвижном основании) со значительными угловыми скоростями и ускорениями;
- выполнение набора сложных функций — поиск и обнаружение астроориентиров, их селекция на фоне помех, слежение за астроориентирами, точное измерение угловых координат; особо здесь следует отметить функции распознавания групп звезд и определения трехосной ориентации, требующие больших интеллектуальных ресурсов;
- работоспособность в условиях воздействия факторов космического пространства (глубокий вакуум, солнечная радиация, ионизирующие излучения, газопылевое окружение) в течение длительного времени (до 10–15 лет и более);
- воздействие различных факторов со стороны космического аппарата — механических, тепловых, электрических и др.

Все эти требования должны учитываться при проектировании современных приборов ориентации и навигации КА.

1.2. Основные типы приборов ориентации и навигации КА

За пять десятилетий космической эры было разработано несколько десятков разновидностей приборов ориентации и навигации КА, отличающихся назначением, принципами построения, особенностями использования, конструктивными особенностями и т.д. К настоящему времени сложилось более или менее общепризнанное разделение астроприборов на типы.

Прежде всего, приборы разделяются по характеру использования их в составе КА — автоматические и визуальные. Первые предназначены для работы в составе автоматических систем управления, вторые — для визуального наблюдения оператором-космонавтом результатов измерения с целью последующего

управления пилотируемым КА. Область применения автоматических астроприборов постоянно расширялась, и именно этому классу приборов обязана своим развитием техника оптико-электронных приборов ориентации и навигации КА на протяжении последних нескольких десятилетий. Визуальные астроприборы в силу своего назначения являются фактически уникальными изделиями индивидуального производства, изготавливаемыми в единичных экземплярах. В связи с этим наиболее богатый опыт проектирования, наиболее значимые результаты теоретических и экспериментальных исследований были получены для автоматических астроприборов. Поэтому дальнейшее наше изложение посвящено автоматическим приборам.

По своим функциональным возможностям и количеству решаемых задач астроприборы можно разделить на универсальные и специализированные. Универсальные астроприборы — это приборы широкого применения, способные обеспечить решение любой из перечисленных выше задач: астроориентации, астрокоррекции, астронавигации, индикации положения. Такие приборы должны работать в различных режимах в условиях высокого уровня помех. Характер обмена их с внешними абонентами должен быть достаточно гибок и универсален, чтобы удовлетворить требованиям «стыковки» с системами управления на различных КА. Один и тот же универсальный прибор может быть использован для решения целого класса задач на различных КА. Специализированные астроприборы предназначены для решения какой-либо конкретной задачи. Они разрабатываются, как правило, для изготовления больших серий или для выполнения уникальных сложных задач, которые не могут быть решены универсальными средствами, или, наоборот, очень простых задач, затраты на решение которых невелики и использование сложных универсальных приборов неоправданно дорого.

Общепризнанным является разделение астроприборов по типам используемых ими астроориентиров. По этому признаку выделяются три типа приборов — приборы ориентации и навигации по звездам, по Земле, по Солнцу (более кратко — звездные, земные и солнечные астроприборы). Поскольку Земля как тип астроориентира может выступать двояко в зависимости от диапазона длин волн используемого излучения, земные приборы еще подразделяются на приборы видимого диапазона и приборы инфракрасного (ИК) диапазона. В видимом диапазоне Земля представляется в виде либо светлого круглого диска, либо серпа, либо вообще не видна в зависимости от угла Солнце–КА–центр Земли. Это создает определенные ограничения в получении информации с прибора, работающего по Земле в видимом диапа-

зоне. В ИК-диапазоне Земля представляет собой круглый излучающий диск вне зависимости от каких-либо условий, поэтому земные приборы ИК-диапазона свободны от ограничений в возможности получения с них информации, благодаря чему они находят гораздо более широкое применение, чем земные приборы видимого диапазона. В видимом диапазоне работают звездные и солнечные приборы.

Кроме указанных трех типов астроприборов, выделяемых по типу используемого астроориентира, в истории развития астроприборов были не получившие широкого применения и такие, которые не вписываются в приведенную выше схему. Побудительным мотивом для их создания служило стремление решить задачу астронавигации с очень высокой точностью, используя то обстоятельство, что для определения навигационных параметров достаточно знать только угол между астроориентирами без «привязки» к системе координат КА. В таких приборах, использующих по существу принцип секстанта, с помощью двухканальной оптической системы в одно поле изображений проецировалось два поля предметов, например поле предметов звездного канала и поле предметов земного канала. Далее устройство обработки определяло расстояние между изображением звезды и краем или центром изображения Земли. По такому принципу были спроектированы автоматические секстанты, отечественный звездно-планетный прибор для навигации в районе Фобоса.

Для навигационной задачи на основе так называемых горизонтных методов [54] для орбитального корабля «Буран» был разработан астронавигационный прибор, определяющий момент времени восхода или захода Солнца по изменению освещенности на его входном окне. По формальному признаку его можно было отнести к солнечным приборам ориентации и навигации с оговоркой, что он не является углоизмерительным прибором, а по существу представляет собой фотометр. Подробнее об этом приборе см. [67].

Были предложения по созданию приборов для реализации горизонтных методов навигации путем наблюдения восхода или захода звезды за горизонт и регистрации изменения ее видимого блеска или угла рефракции [49, 59], а также зондовых методов навигации [54]. Эти предложения не получили развития в виде конкретных проектных разработок и сегодня не рассматриваются в качестве перспективных. По этой причине дальнейшее изложение мы посвятим рассмотрению традиционных звездных, земных и солнечных астроприборов, получивших широкое распространение на КА различного назначения. Продолжая рассмотрение типов астроприборов, вернемся к звездным приборам.

1.2.1. Звездные приборы

Звездные приборы универсального типа разделяются на приборы с подвижным угловым полем (с подвижной визирной линией) и с неподвижным угловым полем (статические). Приборы с подвижным угловым полем — достаточно узкопольные (угловое поле — единицы квадратных градусов и менее). Так как положение углового поля может меняться относительно базы прибора и осей КА, для их работы достаточно сравнительно небольшого количества звезд (до 3–3,5 звездной величины). Благодаря малому угловому полю эти приборы обладают высокой помехозащищенностью по отношению к световым помехам всех видов. Однако конструкция этих приборов достаточно сложна, так как в состав их входят прецизионные поворотные устройства, приводы, устройства преобразования углов поворота в код. Поэтому в таких приборах сложнее достичь высокой точности, надежности и большого срока службы.

Приборы с неподвижным угловым полем конструктивно менее сложны, что упрощает достижение высокой точности и надежности. Размер углового поля таких приборов — до десятков и сотен квадратных градусов. Так как угловое поле не может наводиться в произвольную область небесной сферы, для их работы требуется больше рабочих звезд (до 5–6 звездной величины и более) приводит к большой чувствительности к световым помехам.

Специализированные звездные приборы отличаются большим разнообразием, но в настоящее время можно выделить три группы, различающиеся как по назначению и выполняемым функциям, так и по конструктивным особенностям:

- звездные ОЭП солнечно-звездных систем ориентации КА;
- звездные ОЭП для ориентации по Полярной звезде в системе управления КА с геостационарной орбитой;
- приборы для КА, стабилизированных вращением.

В последующих разделах будут рассмотрены конкретные варианты указанных выше типов звездных приборов.

Перечисленные типы звездных ОЭП отличаются большим разнообразием требований по чувствительности, помехозащищенности, точности, быстродействию, размеру углового поля, сроку службы и т.д. Из всей этой совокупности требований можно выделить два, которые являются общими для всех типов приборов:

- высокая точность конечных измерений при сравнительно низкой точности знания положения рабочей звезды перед началом работы ОЭП;
- необходимость работы в условиях световых помех.

Благодаря этому возможно, основываясь на опыте проектирования звездных ОЭП в нашей стране и за рубежом, на результатах теории приема пространственно-временных сигналов, сформулировать основные правила проектирования звездных ОЭП, которые будут приведены ниже.

1.2.2. Земные приборы ИК-диапазона

Приборы ориентации по Земле (ПОЗ) по функциональному назначению, возможностям и особенностям применения можно разделить на три типа:

- датчики наличия Земли (ДНЗ);
- построители местной вертикали (ПМВ);
- измерители угла отклонения.

Датчики наличия Земли определяют присутствие Земли в одном из двух угловых полей, неподвижно расположенных относительно КА и развернутых одно относительно другого на 180° . В этих приборах отсутствуют сканирующие устройства, а модулятор выполняет модулирование падающего на приемник излучения.

Построители местной вертикали определяют отклонение оси прибора от направления на центр Земли в двух взаимно перпендикулярных плоскостях в пределах небольшой зоны углов отклонения и формируют выходной управляющий сигнал U — линейный или ступенчатый в зависимости от угла отклонения α , (рис. 1.1). Определение углов отклонения производится сканированием углового поля прибора по круговой траектории (поэтому приборы этого типа называют также приборами с круговым сканированием) и формированием выходных сигналов с помощью фазовых детекторов. При отсутствии рассогласования траектория сканирования совпадает с горизонтом Земли. Размер зоны линейности выходных сигналов небольшой, как правило, $1-2^\circ$, наименьшая погрешность достигается при отсутствии рассогласования, при его увеличении — погрешность возрастает. Серьезным недостатком приборов этого типа является большая методическая погрешность, вызванная неравномерностью излучения

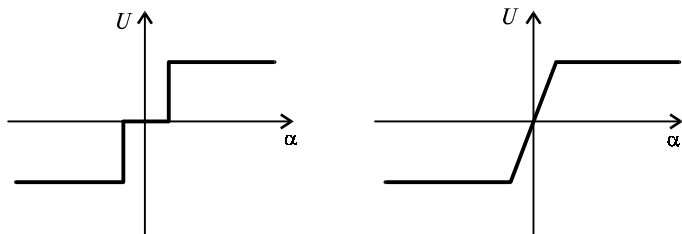


Рис. 1.1. Варианты характеристик управляющих сигналов ПМВ

Земли. Исторически создание ПОЗ началось именно с ПМВ, поэтому ПМВ — наиболее многочисленная группа ПОЗ. В нашей стране до начала 1990-х годов разработано несколько десятков разновидностей таких приборов, в настоящее время приборы этого типа не разрабатываются прежде всего из-за их недостаточной точности.

Измерители угла отклонения определяют угол отклонения оси прибора от направления на центр Земли в широком диапазоне — до десятков градусов, в котором точность этих приборов изменяется мало. В них используется так называемый секущий принцип сканирования, при котором траектория сканирования их визирных линий лежит либо в плоскости, либо на конической поверхности, пересекающей окружность горизонта Земли. Приборы этого типа называют также приборами с секущим сканированием. Измерители угла отклонения начали разрабатывать в конце 1970-х годов, к настоящему времени в нашей стране разработано около десяти разновидностей таких приборов, в основном однокоординатных. Только в последние годы созданы двухкоординатные приборы секущего типа, подробнее о них будет сказано в следующих главах.

Перечисленные типы ПОЗ строятся на основе одноэлементных приемников излучения и оптико-механического сканирования. Отечественные оптико-механические сканеры сегодня — это высоконадежные прецизионные устройства с ресурсом непрерывной работы до 15 лет. Таких характеристик удалось достичь благодаря постоянному совершенствованию их конструкции и технологии сборки в течение нескольких десятилетий. Однако трудоемкость изготовления механических сканеров высока. За рубежом в конце 1990-х годов были разработаны ПОЗ на базе многоэлементных приемников ИК-диапазона — линейчатых, крестообразных. В нашей стране ведутся разработки ПОЗ на базе матричных ИК-приемников [12]. Такие статические ПОЗ по своим функциональным возможностям относятся к измерителям угла отклонения.

Угловой размер Земли, наблюдаемый с орбиты КА, зависит от высоты аппарата над Землей и может меняться для разных орбит от примерно 153° для высоты 180 км до примерно 17° для высоты 36 000 км (геостационарная орбита) и до еще меньших размеров на больших высотах; поэтому конструкция оптической системы ПОЗ и прибора в целом существенно зависит от его рабочей высоты. Существуют приборы для одной рабочей высоты, для дискретного набора высот, для широкого или узкого диапазона высот. Чем шире диапазон рабочих высот ПОЗ, тем при прочих равных условиях сложнее его конструкция.

Из перечисленных типов ПОЗ к универсальным в полном смысле того определения, которое было дано выше, можно отнести лишь измерители угла отклонения. ПМВ из-за малого размера линейной зоны и низкой точности могут использоваться лишь для относительно грубой ориентации для орбит весьма ограниченных типов. Решение навигационной задачи с их помощью также выполняется с большой погрешностью, поэтому для этих целей они используются редко. Учитывая эти обстоятельства, ПМВ, как и ДНЗ, следует отнести к приборам специализированного типа.

При проектировании земных приборов ИК-диапазона, как и при проектировании звездных приборов, существует серьезная проблема выделения полезной информации из помех, которая решается на основе общих принципов обработки пространственно-временных сигналов, о которых упоминалось в разд. 1.2.1.

1.2.3. Солнечные приборы

Приборы ориентации по Солнцу (ПОС) отличаются большим разнообразием вариантов конструктивных и оптических схем, способов формирования выходной информации. Это связано с тем, что Солнце настолько мощный источник излучения, что вопрос о выделении полезного сигнала из помех практически не стоит, и поэтому при создании приборов отсутствуют ограничения, вытекающие из требований оптимизации пространственно-временной обработки по критерию минимизации влияния помех. Проектировщик солнечных приборов имеет гораздо большую свободу выбора вариантов, чем проектировщик звездных и земных приборов.

По функциональным возможностям и особенностям использования среди солнечных приборов можно выделить четыре группы:

- датчики направления на Солнце грубые (ДНС-Г);
- датчики направления на Солнце точные (ДНС-Т);
- измерители угловых координат Солнца грубые;
- измерители угловых координат Солнца точные.

Обособленной группой являются датчики наличия Солнца, которые применяются для определения нахождения Солнца в их угловом поле. Эти датчики, как правило, устанавливаются соосно блендам звездных приборов и вырабатывают управляющий сигнал на закрытие шторки, установленной за блендой.

Датчики направления на Солнце грубые используются в основном для ориентации солнечных батарей на Солнце путем

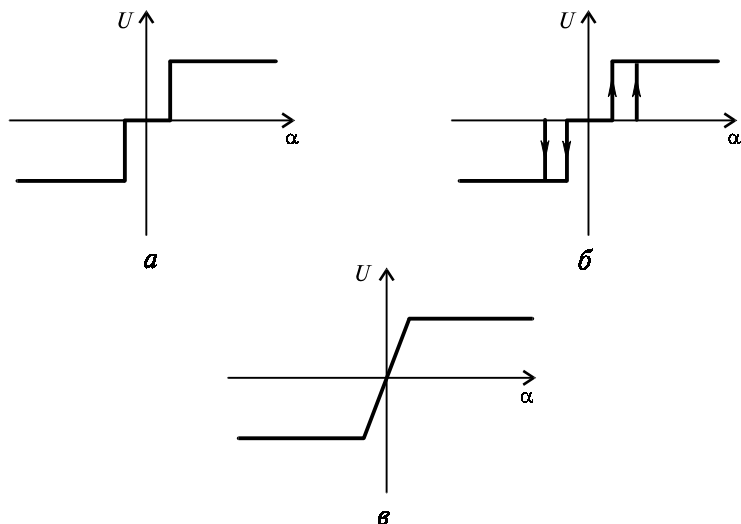


Рис. 1.2. Варианты характеристик управляющих сигналов датчиков направления на Солнце ДНС-Г (а, б) и ДНС-Т (в)

управления разворотом либо самих солнечных батарей, либо КА в целом (так называемый режим постоянной солнечной ориентации КА). Зависимость выходного сигнала прибора от угла разворота (характеристика управляющего сигнала) относительно направления на Солнце обычно имеет релейный или релейно-подобный характер с большой зоной нечувствительности — несколько градусов. Типичная характеристика управляющего сигнала ДНС-Г представлена на рис. 1.2, а, б. Главное достоинство таких приборов — конструктивная простота, высокая надежность, большой срок службы. Типичный вариант их применения — обеспечение постоянной ориентации на Солнце при межпланетных полетах.

Датчики направления на Солнце точные используются для ориентации КА относительно направления на Солнце при выполнении целевых задач. Эти приборы имеют небольшую угловую зону (несколько градусов), где обеспечивается высокая точность определения направления на Солнце (несколько угловых минут), и большую угловую зону поиска — до $\pm 90^\circ$, в которой определяются лишь наличие Солнца и знак отклонения оси прибора от направления на Солнце. Типичная характеристика управляющего сигнала ДНС-Т представлена на рис. 1.2, в.

Приборы-измерители угловых координат Солнца относительно приборной базы определяют соответствующие углы в большом угловом поле — вплоть до полусферы или даже полной сферы.

Грубые приборы этого типа (точность — единицы градусов) строились на основе дискретного набора чувствительных зон или кодовых масок. В точных приборах (точность до $1'$) используются широкопольные сканирующие или многоэлементные обзорные системы, в которых благодаря применению вычислительных средств и методов интерполяции удается получить точность 10^{-4} от размера поля обзора.

Из перечисленных типов приборов первые два ДНС-Г и ДНС-Т являются специализированными, предназначенными в основном для ориентации и только в отдельных частных случаях могут обеспечить решение других задач. К универсальным приборам в смысле определения, данного ранее, можно отнести лишь точные измерители угловых координат Солнца. Грубые измерители этого типа с точностью порядка 1° хотя в принципе и могут использоваться для астронавигации, однако их низкая точность обесценивает такую возможность.

С точки зрения конструктивных особенностей, которые мало затрагивают их эксплуатационные характеристики, солнечные приборы можно разделить на два типа — сканирующие (с оптико-механическим сканером) и статические (с многоэлементным приемником). По своим потребительским качествам, включая такие, как надежность, ресурс, эти два типа приборов сегодня примерно равноценны. В сканирующих приборах большой срок службы и высокая надежность достигается использованием тщательно отработанных в течение нескольких десятилетий простых конструктивных решений и технологий. В статических приборах те же самые характеристики обеспечиваются более универсальными современными средствами — современной элементной базой, современными электронными технологиями. Прогресс в области технологий микроэлектромеханических систем позволяет надеяться на возможность качественных изменений и в создании микросканеров.

1.2.4. Земные приборы видимого диапазона

Земные приборы видимого диапазона имеют ограниченное применение из-за их серьезного основного недостатка — ограничения по времени работы, вызванного изменением в течение суток размеров и формы освещенной Солнцем наблюдаемой поверхности Земли вплоть до полного затенения. На начальном периоде создания астроприборов, когда погрешность земных приборов ИК-диапазона составляла десятки угловых минут, проектирование земных приборов видимого диапазона было оправдано, так как их погрешность не превышала $2-3'$. Сегодня, когда погрешность приборов ИК-диапазона доведена до $3-5'$, преиму-

щество приборов видимого диапазона практически отсутствует. За всю историю отечественного космического приборостроения было создано лишь три варианта земных приборов видимого диапазона, которые регулярно использовались на КА, — прибор на межпланетных станциях «Венера», работающий по Земле с больших расстояний как по точечному источнику, прибор на одном из типов КА серии «Космос», прибор разработки ФГУП «НПП ОПТЭКС» на КА типа «Ямал» [20].

1.3. Астроориентиры и оптические помехи для приборов ориентации и навигации КА

В целом оптические помехи астроприборов подразделяются на боковые, фоновые и точечные. Источники боковых помех располагаются вне углового поля астроприбора, но из-за светорассеяния в оптической системе их мешающее влияние проявляется в пределах углового поля. При приближении источника этих помех к угловому полю их влияние усиливается, поэтому принимаются те или иные меры, исключающие их недопустимое воздействие на прибор. Фоновые помехи находятся в угловом поле астроприбора. Как правило, им приписывают одинаковую яркость по всему угловому полю. Однако на практике они всегда обладают тем или иным градиентом по полю. Точечные помехи также могут располагаться в угловом поле прибора.

Следует иметь в виду, что одни и те же астрономические источники излучения могут быть как астроориентирами, так и оптическими помехами. Например, звезды в угловом поле звездного прибора могут быть либо астроориентирами, либо точечными помехами. Солнце для солнечных приборов астроориентир, а для звездных приборов — боковая помеха.

1.3.1. Звезды и помехи для звездных приборов

Звезды. Для проектирования звездных приборов важны те характеристики звезд, которые влияют на работоспособность и параметры этих приборов, определяют принцип их построения. К таковым относится прежде всего интенсивность излучения звезд, а также спектральный состав этого излучения.

Интенсивность излучения звезд характеризуется блеском, под которым понимается величина, измеряемая в звездных величинах,

$$m = -2,5 \lg (E/E_0),$$

где E — освещенность от звезды, создаваемая ею на границе земной атмосферы; E_0 — та же освещенность, создаваемая звездой с $m = 0$.

Освещенность E_0 определяет нуль-пункт шкалы звездных ве-

личин и различается для разных фотометрических систем. Наиболее распространенной является визуальная фотометрическая система V, которая базируется на приемнике со спектральной чувствительностью, соответствующей кривой видности глаза. Звездные величины в системе V обозначаются m_V . Для приемников или излучателей, спектральные характеристики которых существенно отличаются от кривой видности глаза, используют также фотометрические системы U (ультрафиолетовая) и В (голубая). Для более полного описания спектральных особенностей излучения звезд используют так называемую трехцветную фотометрическую систему Джонсона UBV, объединяющую три вышеупомянутые системы. В системе UBV каждая звезда характеризуется тремя звездными величинами m_U , m_B , m_V , соответствующими одной из систем U, В или V.

Освещенность от звезды с $m_V = 0$ в системе V согласно [4] составляет $E_0 = 2,54 \cdot 10^{-6}$ лк. В других литературных источниках можно найти несколько отличающихся значений. Такая неоднозначность вызвана тем, что связь между звездными величинами m_V и люксами определяется через кривую видности глаза $v(\lambda)$, нормировка которой в течение XX в. несколько раз менялась. В нашей стране с 1978 г. действует ГОСТ 8.332–78, нормирующий $v(\lambda)$.

На практике, как правило, характеристики спектральной чувствительности приемников отличаются как от кривой видности глаза, так и от характеристик спектральной чувствительности систем U и В. Для таких случаев вводится понятие эквивалентной освещенности. При этом рассматриваются два источника излучения И1 и И2, относительная спектральная плотность излучения которых соответственно $p_1(\lambda)$ и $p_2(\lambda)$, и приемник излучения со спектральной чувствительностью $s(\lambda)$. В качестве источника И1 обычно используется один из стандартных или общепринятых источников (например, источники А, В, С, Солнце и т.д.).

Для источника И2, создающего на приемнике с заданной спектральной чувствительностью $s(\lambda)$ освещенность E_2 , эквивалентной освещенностью в спектре И1 $E_{\text{экв}}^{\text{И1}}$ называют такую освещенность E_1 от источника И1, реакция приемника на которую совпадает с его реакцией на освещенность E_2 от источника И2. Подчеркнем, что понятие эквивалентной освещенности предполагает наличие двух источников с различными спектральными характеристиками излучения и приемника с известной спектральной чувствительностью. Применительно к астроприборам в качестве стандартного источника И1 чаще всего используется Солнце (спектр G2-V) или источник А. Из приведенного определения вытекает следующее соотношение между эквивалентной

освещенностью $E_{\text{экв}}^{\text{G2}}$ в спектре G2-V от некоторой звезды и освещенностью от нее в обычном понимании E^3 :

$$E_{\text{экв}}^{\text{G2}} = E^3 \frac{\int s(\lambda) p^3(\lambda) d\lambda \int p^{\text{G2}}(\lambda) v(\lambda) d\lambda}{\int v(\lambda) p^3(\lambda) d\lambda \int s(\lambda) p^{\text{G2}}(\lambda) d\lambda},$$

где $p^3(\lambda)$, $p^{\text{G2}}(\lambda)$ — спектральная плотность излучения рассматриваемой звезды и звезды спектрального класса G2-V соответственно; $E_{\text{экв}}^{\text{G2}}$ измеряется, как и обычная освещенность, в люксах.

На основе понятия эквивалентной освещенности вводится также понятие эквивалентных звездных величин (в спектре G2-V) m_V^{G2} аналогично понятию обычных звездных величин:

$$m_V^{\text{G2}} = -2,5 \lg \left(\frac{E_{\text{экв}}^{\text{G2}}}{2,54 \cdot 10^{-6}} \right).$$

Этим самым все звезды как бы приводятся к одному спектральному составу в фотометрической системе применяемого приемника.

В практических расчетах эквивалентную звездную величину m_V^{G2} для конкретных звезд определяют поправкой Δm к звездной величине m_V :

$$m_V^{\text{G2}} = m_V + \Delta m.$$

Поправка Δm может вычисляться на основе приведенных выше формул, но для этого необходимо знать спектральные характеристики излучения звезд $p^3(\lambda)$. Если они неизвестны, то для вычисления поправки Δm используются так называемые показатели цвета. В системе UBV используются два показателя цвета U-B и B-V, которые в обобщенном виде описывают спектральные свойства излучения звезд. Показатель цвета U-B равен разности звездных величин в системах U и B, показатель цвета B-V — соответствующей разности в системах B и V. Зная эти два показателя цвета, с помощью редукционных формул можно определить поправку Δm для каждой конкретной звезды [41].

Оптические помехи для звездных приборов. Освещенность на входе звездного прибора от самой яркой из звезд Сириуса $\sim 4 \cdot 10^{-6}$ лк, а от самого мощного источника помех — Солнца $E_{\odot} \approx 1,4 \cdot 10^5$ лк. Уже из сопоставления этих чисел становится понятным, что должно существовать большое количество естественных и искусственных источников излучения, которые создают помехи для работы такого прибора.

Начнем с наиболее мощных источников боковых помех, освещенность от которых на несколько порядков превышает освещенность от звезд, и потому попадание их в угловое поле прибора

недопустимо. К таким помеховым источникам относятся Солнце, освещенная Солнцем Земля (или другая планета, вблизи которой находится КА со звездным прибором), освещенные Солнцем элементы конструкции КА. Основные параметры Солнца и Земли для приборов видимого диапазона приведены в разд. 1.3.3. Для борьбы с помехами этого типа используются бленды различных конструкций. Степень опасности той или иной внеполевой помехи зависит как от освещенности от нее на входе бленды, так и от угла между направлением ее прихода и осью визирования прибора (угла засветки). Если аппроксимировать пространство, окружающее бленду, освещенной Солнцем белой диффузно рассеивающей поверхностью, то можно получить верхнюю границу освещенности на входе бленды от боковых засветок

$$E_{\max} = 2E_{\odot}.$$

Эта аппроксимация оправдана при отсутствии зеркально отражающих элементов конструкции. На практике такая аппроксимация оказывается слишком грубой и требуется учитывать реальные угловые размеры и коэффициенты яркости светорассеивающих элементов КА и Земли, углы падения и рассеяния излучения боковой помехи. (Методику таких расчетов можно найти в [51, 71] и в разд. 3.2.1 и 3.3.3 данного издания.) Решающим здесь являются результаты экспериментальных исследований. Пример таких исследований можно найти в [73]. Примеры распределения освещенности от рассеянного света в фокальной плоскости объектива звездного прибора представлены на рис. 1.3.

Свет Луны представляет собой отраженное солнечное излучение. Альbedo лунной поверхности меняется в пределах от 0,054 до 0,176, среднее значение по всему диску — 0,073. Средний угловой размер Луны — $31'05''$, пределы изменения — от $33'32''$ до $29'20''$ [18, 19] (при наблюдении с Земли).

Освещенность от Луны также достаточно велика (0,32 лк в полной фазе) по сравнению с освещенностью от звезд. В зависимости от качества (светорассеяния) оптической системы прибора она может быть не допущена к попаданию в угловое поле (для систем с большим светорассеянием) и рассматриваться как боковая помеха либо (для систем с малым светорассеянием) может находиться в угловом поле и рассматриваться как яркая сосредоточенная световая помеха (об этом см. ниже).

Фоновые помехи — помехи, источники которых находятся в пределах углового поля прибора. Можно отметить следующие источники таких помех:

- свечение ночного неба;
- световые природные явления в верхней атмосфере Земли: полярные сияния, серебристые облака и др.;
- газопылевое окружение КА, освещенное Солнцем.

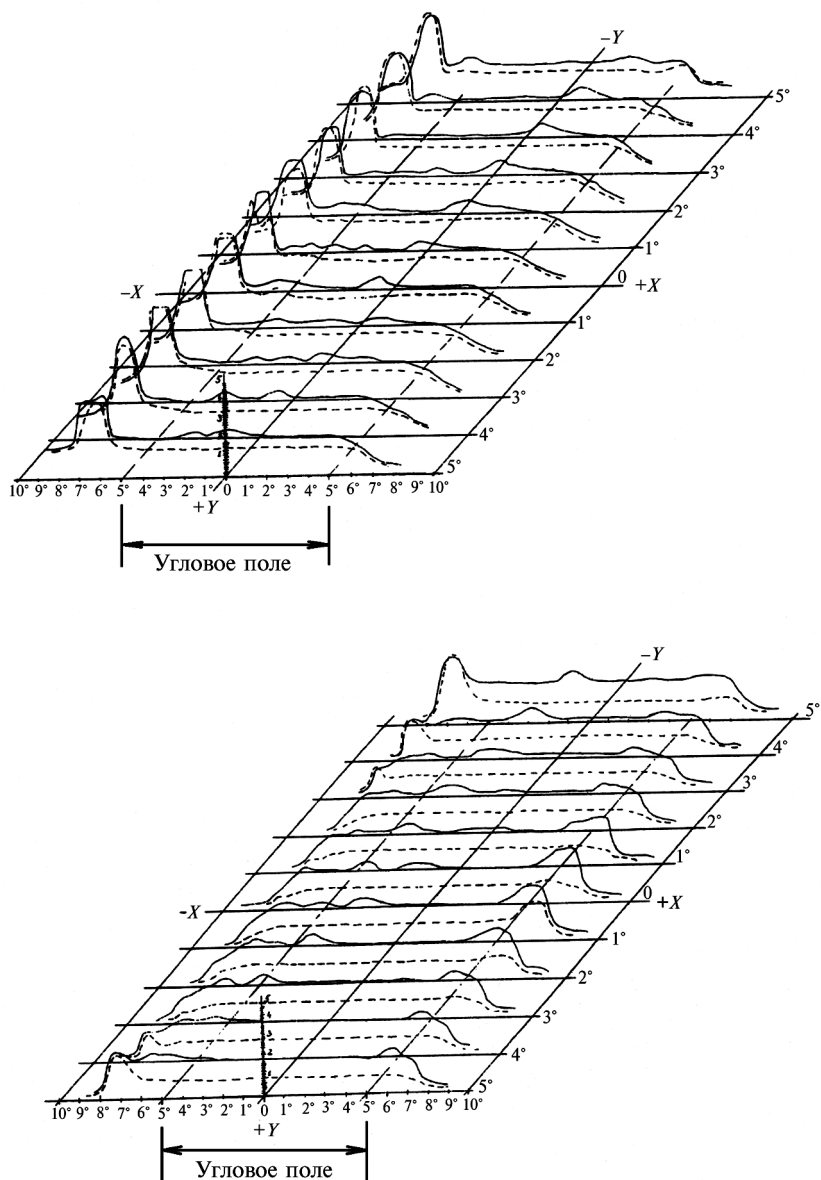


Рис. 1.3. Примеры распределения освещенности рассеянного света в фокальной плоскости объектива звездного прибора

Яркость ночного неба за пределами земной атмосферы по разным данным [4, 5] оценивается от $1,3 \cdot 10^{-4}$ до $3,4 \cdot 10^{-4}$ кд/м². Полярные сияния [4] создают свечение яркостью до 0,2 кд/м², серебристые облака — до 1–3 кд/м² [8], однако и те и другие наблюдаются на высотах до 100–150 км, где не проходят орбиты КА.

Газопылевое окружение КА, освещенное Солнцем, вносит существенный вклад в фоновую составляющую световых помех. Оно порождается работой систем обеспечения жизнедеятельности КА (реактивных двигателей ориентации, пироустройств), выделением газа и пыли с поверхности КА, оставшихся там после выведения на орбиту, разрушением поверхности КА под действием микрометеоритов и т.п.

Изменение светотехнических характеристик помех от газопылевого окружения (ГПО) во времени и пространстве зависит от многих факторов: высоты орбиты, типа используемых двигателей ориентации, расположения оси визирования прибора относительно осей двигателей ориентации и т.п. При исследовании яркости ГПО используются специализированные фотометры, установленные на КА, и сами звездные приборы. Некоторые звездные приборы могут работать в режиме фотометра и измерять яркость фоновых помех. На основании опыта эксплуатации звездных приборов на различных типах КА и обобщения литературных данных [7, 50] можно представить следующую картину световой обстановки вокруг КА, создаваемой газопылевым окружением.

Для низкоорбитальных (высота 200–300 км) активно функционирующих КА сразу после вывода на орбиту яркость собственной атмосферы, освещенной Солнцем, может достигать единиц кандел на квадратный метр и в течение часа снижается до порядка 10^{-3} кд/м², оставаясь на этом уровне при отсутствии возмущений со стороны КА. Довольно быстрое снижение яркости свидетельствует об эффективном «сдувании» ГПО набегающим потоком остаточной атмосферы. При механических возмущениях (раскрытии панелей солнечных батарей, срабатывании пироустройств и т.п.) яркость ГПО быстро возрастает до тех же единиц кандел на квадратный метр и затем плавно уменьшается до стационарного значения за несколько десятков секунд. Аналогичная картина возникает при срабатывании импульсного реактивного двигателя системы ориентации, если его струя пересекает угловое поле регистрирующего прибора. Существенно больший уровень яркости (до нескольких десятков кандел на квадратный метр) возникает при срабатывании более мощных реактивных двигателей, но время спада яркости составляет также несколько десятков секунд.

Для условий высокоорбитальных полетов (геостационарная орбита) картина световых помех имеет некоторые особенности.

Они вызваны тем, что на этих высотах отсутствует остаточная атмосфера и наиболее существенным естественным фактором, влияющим на поведение ГПО, является давление солнечного света [77]. Поэтому процесс естественного «обеспыливания» выведенного на геостационарную орбиту КА длится значительно дольше, чем на низких околоземных орбитах. Если КА находится на неосвещенной стороне орбиты, то частицы, генерируемые с поверхности КА, скапливаются около него. Сразу после выхода КА на освещенную сторону их плотность в несколько раз превышает среднюю, которая постепенно снижается до стационарного значения за несколько часов. Поскольку габаритные размеры аппаратов, выводимых на геостационарную орбиту, существенно меньше, чем на низких приземных орбитах, то стационарное значение яркости собственной внешней атмосферы (СВА) для них, как правило, также меньше, и большую опасность представляют так называемые «светящиеся частицы» — медленно дрейфующие под действием давления света частицы вещества, освещенные Солнцем. Кроме «светящихся частиц» к точечным помехам в ряде случаев относятся звезды — помехи, планеты, малые планеты и т.д., расположенные в угловом поле звездного прибора и обладающие существенно большей яркостью, чем фоновые помехи.

Общая помеховая обстановка для звездного прибора на КА определяется совокупностью перечисленных факторов и может быть весьма сложной. По пространственно-временным характеристикам световые помехи могут быть разделены на следующие составляющие:

- фон постоянной яркости, равномерный в пределах углового поля; в чистом виде такого фона реально не существует, однако такое представление удобно для сопоставления и анализа различных технических решений;
- распределенный фон, медленно меняющийся в пределах углового поля, характеризуется максимальной и минимальной яркостью и градиентом яркости;
- сосредоточенные (квазиточечные) помехи, угловой размер которых соизмерим или меньше углового размера элементарного анализатора в приборе, характеризуются вероятностным распределением источников по положению в пространстве, силе света, угловой скорости перемещения и другим параметрам;
- быстроменяющийся во времени (импульсный) фон, характеризуется амплитудой импульса яркости, его длительностью, временем нарастания и спада.

Для расчетных оценок помехозащищенности звездных приборов, математического моделирования и при испытаниях исполь-

зуют светотехнические модели помеховой обстановки, включающие перечисленные выше составляющие, количественные характеристики которых являются специфическими для того или иного типа КА.

Перечисленные составляющие характеризуют внешнюю по отношению к прибору фоновую обстановку. В приборах, построенных на основе многоэлементных приемников (матричных, линейчатых), возникает специфический внутренний фон, порожденный неравномерностью темнового сигнала отдельных элементов и неравномерностью их световой чувствительности. Это так называемый «геометрический шум» (в отличие от «временного шума», порождаемого флуктуациями электрического тока в фотоэлектрическом тракте), характерный для приборов с многоэлементными приемниками [75]. Этот шум содержит несколько составляющих (коррелированные, некоррелированную), для его описания могут использоваться различные модели, в том числе и двухуровневая «эвристическая» модель случайного фона [39]. В любом случае вид и параметры модели должны определяться на основе экспериментальных данных.

1.3.2. Земля и помехи для земных приборов ИК-диапазона

Излучение Земли, наблюдаемой из космоса, в той части ИК-диапазона, которая используется в приборах ориентации (длина волны излучения $\lambda > 7$ мкм), представляет собой практически полностью собственное излучение атмосферы и поверхности Земли. Влияние отраженного солнечного излучения в этом диапазоне пренебрежимо мало, так как оно сосредоточено на длинах волн менее 3 мкм [18]. При этом имеет место сложная композиция излучений различных природных образований — поверхности самой Земли (почвы, воды, снега), верхней поверхности облаков, различных слоев атмосферы. Поверхность облаков излучает как черное тело с температурой облаков, поверхность Земли в спектральных окнах прозрачности атмосферы — как черное тело с температурой поверхности Земли. В полосах поглощения атмосферы излучение соответствует излучению черного тела при температуре стратосферы. Благодаря тому, что температурные условия на различных высотах и характер облачности постоянно изменяются как на поверхности Земли, так и во времени, энергетическая яркость наблюдаемых из космоса участков Земли представляет собой случайную функцию пространственных координат и времени. Эта яркость может меняться в несколько раз (до 3–4 раз) в зависимости от положения точки на поверхности Земли, времени и длины волны используемого излучения. На основе экспериментальных исследований, проведенных с помощью

установленной на спутниках аппаратуры (в частности, на советских КА «Космос-45» и «Космос-65»), были получены вероятностные характеристики этой случайной функции, которые можно найти в [18]. Согласно этим данным, средняя спектральная светимость Земли в диапазоне длин волн $\lambda = 7\text{--}26$ мкм на широтах от -65° до $+65^\circ$ составляет $2,06$ мВт/(см² · мкм), однако она сильно изменяется в зависимости от длины волны (рис. 1.4 [18]). Из рисунка видно, что с длиной волны изменяется как математическое ожидание интенсивности излучения, так и его флуктуации (среднеквадратическое отклонение). Наименьшие флуктуации излучения наблюдаются в диапазоне 14–16 мкм — в полосе поглощения углекислого газа. Это связано с тем, что в верхней атмосфере на высоте около 40 км слой углекислого газа мало подвержен изменениям и поглощает излучение нижележащих слоев. Поэтому для наиболее точных приборов ориентации в качестве рабочего диапазона выбирается полоса 14–16 мкм.

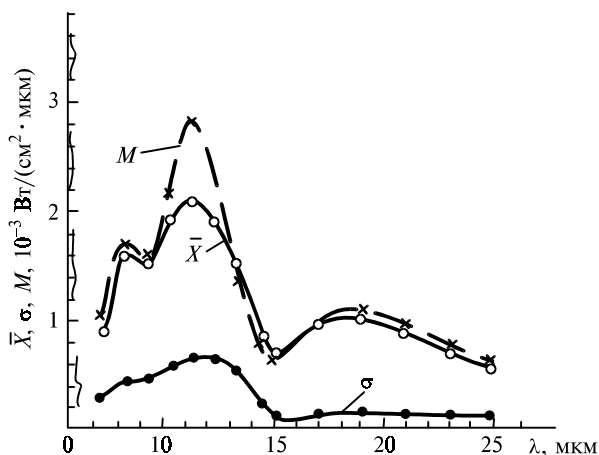


Рис. 1.4. Зависимость математического ожидания $\bar{X}$, среднеквадратического отклонения σ и моды M спектральной энергетической светимости Земли от длины волны λ в диапазоне от 7 до 26 мкм

При проектировании приборов ориентации по Земле и их испытаниях используются различные модели излучения Земли. Простейшая модель (модель А) — это равноркий диск, угловой размер которого соответствует угловому размеру Земли, наблюдаемый с заданной высоты, а энергетическая яркость равна минимальной, максимальной или средней энергетической яркости реальной Земли для выбранного спектрального диапазона. Такая модель удобна при расчетах режима поиска в приборах, оценочных точностных расчетах, при настройке и паспортизации система-

тических составляющих погрешности приборов, при предварительной оценке точности на испытаниях. Поскольку неравномерные распределения яркости излучения для реальной Земли может вносить существенную погрешность в угловые измерения прибора, то модель А является слишком грубой для достоверной оценки действительных значений погрешности приборов.

Следующим приближением является неравномерная модель В — тот же диск, но состоящий из двух полудисков, каждый из которых имеет свою яркость. Перепад яркостей между полудисками составляет ту величину, которую требуется воспроизвести (до 3–4 раз). Модель В отражает свойство неравнояркости реального наблюдаемого диска Земли, но резкий скачок яркости в середине диска, отсутствующий на реальной Земле, зачастую создает дополнительные погрешности в приборе, которые искажают результат измерений.

Существуют варианты статистических моделей излучения Земли, в которых содержатся зависимости статистических характеристик энергетической яркости (или светимости) от координат наблюдаемой точки, календарного времени, длины волны. (Один из таких вариантов описывается в [18].) Статистические модели удобны для компьютерных расчетов и не пригодны для практических испытаний реальных приборов.

Весьма наглядной и иногда используемой в расчетах является линейная модель (модель С) — излучающий диск, яркость которого изменяется от одного его края к другому по линейному закону в тех же пределах, что и в модели В. Такая модель позволяет более достоверно оценить погрешности приборов, об ее экспериментальном использовании не известно.

При анализе работы приборов ориентации Землю рассматривают в первом приближении в виде сферы радиусом 6371 км. Однако реальная Земля несколько сжата вдоль полярной оси, более точно ее поверхность соответствует эллипсоиду, размеры которого (эллипсоида Красовского) — малая полуось 6357 км, большая полуось 6378 км [18].

В качестве естественных помех для приборов ориентации по Земле могут выступать Солнце, Луна. Солнце в ИК-диапазоне излучает как черное тело с температурой 5770 К. Энергетическая яркость центра солнечного диска составляет $24,6 \cdot 10^6$ Вт/(м² · ср) [44], в диапазоне $\lambda = 7\text{--}26$ мкм содержится 0,14% всей излучаемой Солнцем энергии. Эффект воздействия солнечного излучения на земной прибор зависит от используемого спектрального диапазона, углового поля прибора, светосилы оптики. В зависимости от этих обстоятельств сигнал Солнца на выходе приемника в приборе может на один-два порядка превышать сигнал Земли. Поэтому в приборе необходимо предусматривать схемотехнические,

алгоритмические и другие меры для исключения влияния данного явления на работу приборов. Луна в ИК-диапазоне излучает как черное тело с температурой, соответствующей температуре ее поверхности. Максимальная дневная температура поверхности Луны может достигать 373 К, минимальная ночная температура — 120 К [18]. Средний угловой диаметр Луны при наблюдении с Земли 31'. В зависимости от параметров оптики земного ИК-прибора сигнал от Луны на выходе его приемника может доходить до нескольких десятых долей от сигнала Земли. Такое помеховое воздействие создает дополнительную погрешность угловых измерений.

1.3.3. Солнце и Земля как астроориентеры приборов видимого спектрального диапазона

Солнечные приборы ориентации и навигации КА работают в видимом диапазоне спектра. Это объясняется тем, что Солнце в видимом диапазоне излучает более 90% энергии. Согласно модели солнечного излучения [44], освещенность от Солнца на границе верхней атмосферы Земли при среднем расстоянии между Землей и Солнцем составляет 133 000 лк. Яркость центра солнечного диска $2,51 \cdot 10^9$ кд/м² и уменьшается до $1,2 \cdot 10^9$ кд/м² к его краю. Средняя яркость по диску $1,95 \cdot 10^9$ кд/м². При наблюдении с орбиты Земли угловой радиус Солнца меняется от 16,26 до 15,73'; при среднем расстоянии между Землей и Солнцем он равен 15,99'. На солнечном диске имеются пятна, количество которых и занимаемая ими площадь меняются в широких пределах в зависимости от солнечной активности. Средняя яркость пятна составляет примерно 0,5 от яркости прилегающих областей. Для современных солнечных приборов оптических помех практически не существует.

Астроориентером для земных приборов видимого диапазона является Земля. Излучение Земли в видимом диапазоне представляет собой отраженное излучение Солнца и звезд. Коэффициент отражения меняется в зависимости от метеоусловий и характера участков поверхности от 0,1 до 0,8. Усредненное для всего диска Земли значение альбедо — 0,39 [19]. (Геометрические параметры Земли приведены в разд. 1.3.2.) Так как земные приборы видимого диапазона не нашли широкого применения, то детальный анализ их оптических помех приводить не будем. Отметим лишь, что эти помехи являются составной частью помех звездных приборов, описанных в разд. 1.3.1.

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ КА КАК УСТРОЙСТВА ПЕРЕРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

Все разновидности приборов ориентации и навигации КА, о которых говорили в предыдущей главе, принимают оптические сигналы от астрономических источников излучения, содержащие самую разнообразную информацию о самих источниках излучения и в неявном виде о положении осей прибора относительно этих источников. Кроме полезных сигналов на вход приборов поступают различные помеховые излучения. Путем всевозможных преобразований на выходе приборов формируются сигналы, содержащие в явном виде информацию об угловом положении осей прибора. В этом смысле астроприборы представляют собой устройства переработки информации, выделяющие полезную информацию из всей совокупности поступающих на их вход сигналов и помех. Главная задача прибора — выделить полезную информацию наиболее эффективно. Что понимать под эффективностью в этом случае, поясним далее.

При проектировании ОЭП ориентации и навигации КА стоит задача выбора как конструктивных параметров прибора, так и способов обработки информации, причем обе эти стороны взаимосвязаны. Способы обработки информации включают вид преобразования оптического сигнала в электрический (с накоплением энергии или без), способ сканирования пространства, логику перебора накопивших сигнал элементов (для приемников с накоплением), способы обработки электрического сигнала и др. Если при выборе конструктивных параметров проектировщик руководствуется традиционными расчетами (энергетическим, точностным и др.), то с выбором способа обработки информации дело обстоит сложнее. Практика показывает, что зачастую то или иное техническое решение в этой области выбирается либо по традиции, либо на основе сопоставительного анализа нескольких известных проектировщику вариантов, среди которых необязательно имеется наилучший для рассматриваемой задачи. Такая процедура не дает уверенности, что принятое решение действительно лучшее.

В то же время имеется возможность указать основные общие подходы к проектированию ОЭП ориентации и навигации КА, которые позволяют упорядочить процесс выбора способов переработки информации в приборе. В основе упомянутых подходов

лежат два основополагающих требования, распространяющиеся на все типы приборов астроориентации:

- высокая точность конечных измерений при сравнительно низкой точности априорных данных об интересующих параметрах,
- необходимость работы в условиях помех.

Это позволяет на базе результатов теории приема сигналов с учетом опыта создания подобных приборов назвать основные правила их проектирования:

- правило разделения режимов работы;
- правило соответствия пространственно-временной обработки и цели режима;
- правило относительного измерения.

Первые два правила широко применяются в системах связи и локации, не будучи где-то сформулированными в явном виде [6, 43]. Они вытекают из теоретических положений и возможностей реализации этих положений на практике. Правило относительного измерения, специфическое для высокоточных углоизмерительных приборов, отражает опыт достижения высокой точности измерений приборами ориентации и навигации КА в жестких условиях эксплуатации. Оно в значительной степени созвучно известным методам калибровки по опорным точкам, применяемым в аэрофотоъемке [38].

Рассмотрим эти правила подробнее.

2.1. Основные правила проектирования информационных систем приборов ориентации и навигации КА

2.1.1. Правило разделения режимов работы

В каждой из задач, решаемых астроприбором на КА, конечная цель его работы — определить с высокой точностью ориентацию приборных осей (или оси) относительно астроориентиров (или астроориентира). Перед началом работы прибора информация об ориентации весьма скудная или вообще отсутствует. Из теории приема пространственно-временных сигналов (например, [14, 64, 65]) следует, что для минимизации влияния световых помех на точность измерения координат размер зоны, обзораемой ОЭП, должен быть соизмерим с угловыми размерами участков, в которых наблюдаемое изображение ориентира имеет наибольший градиент освещенности. Например, если речь идет о звездном приборе, то размер зоны наблюдения должен соответствовать угловому размеру изображения звезды (или совокупности таких зон, если наблюдается группа звезд). Для земного прибора зона

наблюдения при измерении должна иметь вид кольца, покрывающего ожидаемое изображение окружности земного диска. Но это требование не согласуется с низкой точностью предварительного знания координат ориентира. Для разрешения этого противоречия всю работу ОЭП разделяют на два основных режима — режим поиска и режим измерения, в каждом из которых обработка информации выполняется по своим алгоритмам.

Эти два основных режима не исчерпывают весь перечень возможных режимов работы ОЭП. Достижение основной цели ОЭП — измерения угловых координат ориентиров сопровождается решением попутных задач — селекцией сигналов рабочих источников на фоне помех, «привязкой» результатов промежуточных измерений к базе и др. В связи с этим в работе ОЭП выделяется дополнительно вспомогательные режимы — режим распознавания, режим калибровки и др. Каждый из этих режимов имеет свою цель и свои методы обработки информации. В зависимости от конкретных особенностей того или иного ОЭП эти режимы могут следовать один за другим либо выполняться одновременно. Какие-то режимы могут вырождаться. Например, если ОЭП должен обнаружить звезду и выдать только один отсчет координат, то режим измерения вырождается в однократную процедуру определения местоположения обнаруженной звезды в приборной системе координат.

Таким образом, для достижения конечной цели функционирования астроприбора — измерения с высокой точностью координат ориентиров при получении сопутствующих параметров его функционирования — вся работа прибора должна быть разделена на режимы, в каждом из которых достигается своя цель и обработка сигналов ведется своими методами. Это положение мы и назовем правилом разделения режимов.

Правило разделения режимов не только определяет подход к построению аппаратуры и обработке сигналов в ней, но и позволяет в соответствии с выделенными режимами планировать работы по проектированию ОЭП на всех этапах разработок. Так, будучи принятым на этапе согласования технического задания, разделение режимов работы создаваемого прибора во многом предопределяет последующие работы:

- на этапе проектирования — расчеты, обоснования, методики подтверждения требований разрабатываются применительно к принятым режимам работы;
- на этапе разработки — методики испытаний, технологическое оснащение разрабатываются с учетом принятых режимов работы;
- на этапе отработки образцов — последовательность и объем испытаний соответствуют принятым режимам работы.

2.1.2. Правило соответствия пространственно-временной обработки и цели режима

Обработка информации в любом режиме сводится к совокупности двух видов обработки — пространственной и временной. Здесь мы не рассматриваем обработку в области оптического спектра, поскольку для ОЭП ориентации и навигации КА ее выбор сводится к выбору рабочего спектрального диапазона, о чем упоминалось в разд. 1.2.

Пространственная обработка — это преобразования, которые осуществляются над сигналами каждого отдельного элемента пространства, а заканчиваются интегрированием (суммированием) по пространственным координатам (за исключением случая, когда конечная цель измерения — определение энергии в каждом элементе пространства).

Для временной обработки применяют различные способы фильтрации и формирования управляющих воздействий на устройства, выполняющие пространственную обработку. Для задач приема пространственных сигналов в стационарном случае используются пространственные фильтры с постоянными параметрами [39, 40, 69], а в нестационарном случае (переходные ситуации, работа с подвижной целью, адаптивные системы и т.п.) — пространственные фильтры с изменяющимися во времени параметрами [1, 64, 65]. Таким образом, в общем случае оптимизация обработки пространственно-временных сигналов приводит к единой пространственно-временной системе, в которой пространственная и временная обработка взаимосвязаны и не могут выполняться независимо одна от другой. При этом для каждого режима работы имеется свой, отличный от других режимов, способ обработки, как пространственной, так и временной, который позволяет достичь наилучших результатов. Это вызвано различиями, во-первых, в объеме априорной информации для каждого режима и, во-вторых, в критериях оптимизации, вытекающих из различия целей, которые достигаются тем или иным режимом.

Все вышесказанное можно сформулировать в виде следующего правила (правило соответствия пространственно-временной обработки и цели режима): для достижения наилучших результатов характер пространственно-временной обработки в том или ином режиме работы ОЭП должен выбираться в соответствии с целью этого режима. Вид этого соответствия, т.е. конкретный вид обработки в каждом режиме, устанавливается как результат решения задачи синтеза при определенных априорных данных и критерии оптимизации. Существенное влияние на характер обработки сигналов в том или ином режиме оказывают параметры

движения КА (или основания, на котором установлен прибор) и модель световых помех.

Рассмотрим типичные режимы работы астроприборов, цели, достигаемые этими режимами, и используемые в них критерии оптимизации.

Режим поиска характеризуется тем, что перед его началом отсутствует или крайне ограничена информация о координатах ориентиров в угловом поле. В некоторых случаях может быть известно расчетное значение сигнала от ориентира, а также максимально возможное значение мощности помех. В режиме поиска преследуются две цели:

- подтвердить (или проверить) факт наличия ориентира в угловом поле;
- провести предварительную оценку координат и, возможно, сигналов от ориентиров и помех для перехода в режим измерения.

В общем случае оптимизация поиска может рассматриваться исходя по крайней мере из двух подходов [14]. В первом подходе считают фиксированными некоторые параметры поиска (например, время поиска, мощности сигнала и др.) и с учетом этого формируют алгоритм поиска, который минимизирует цену ошибок (ложного обнаружения и пропуска цели). Такой подход соответствует задаче многоальтернативного обнаружения [43]. Во втором подходе цену ошибочных решений (вероятности ошибок) считают заданной и ищут алгоритм, минимизирующий поисковые усилия. В большинстве случаев оба подхода приводят к одной и той же структуре алгоритма, отличие сводится к различию параметров в алгоритмах. Для астроприборов традиционен второй подход, причем в качестве параметра поиска принимается время поиска.

Отсутствие априорной информации о координатах ориентиров в угловом поле или малая ее достоверность приводят к тому, что задача поиска решается путем поэлементного анализа углового поля (сканирования). Угловой размер элемента соответствует размеру сканирующей апертуры в ОЭП со сканированием или размеру элемента матрицы в ОЭП с матричными приемниками. Для каждого элемента проводится анализ сигнала с учетом данных предыдущих измерений и принимается решение о наличии или отсутствии в нем полезного сигнала (решается задача обнаружения). Решающее устройство поочередно обрабатывает информацию элементов независимо от того, поступает ли она в ОЭП поочередно (в случае сканирования) или одновременно для всех элементов (в случае приемника с накоплением). Таким образом, задача поиска сводится к задаче многоальтернативного обнаружения.

Критерий оптимизации обработки при поиске для рассматриваемых приборов — минимум времени поиска при условии, что вероятности пропуска и ложного обнаружения ориентира не превышают заданных, а точность предварительной оценки координат соответствует требованиям перехода в последующий режим измерения.

В режиме измерения гораздо больше априорной информации: в начале измерения известны предварительные оценки координат и интенсивности полезных сигналов, полученные при поиске; в процессе измерения эти параметры постоянно уточняются. Поэтому при измерении обзор всего углового поля не требуется. Режим измерения имеет две цели:

- определение координат ориентиров с максимальной точностью;
- периодическое подтверждение того, что измеряются координаты нужного источника (рабочего ориентира), а не какой-либо помехи, например светящейся частицы в случае звездного прибора.

Поэтому критерий оптимизации режима измерения — минимум средней квадратической погрешности измерения при заданных требованиях по вероятности потери рабочего ориентира и времени обнаружения этой потери. Пространственная обработка в режиме измерения — это осмотр небольшой зоны поля обзора (следающего раstra) вокруг точек с максимальным градиентом полезного сигнала и определение с помощью дискриминаторов рассогласования между центром этого следающего раstra и направлением на звезду. Временная обработка состоит в фильтрации этого рассогласования и введении поправки, компенсирующей рассогласование, в положении следающего раstra. В целом устройство обработки в режиме измерения представляет собой следающую систему, выполняющую слежение малым растром за направлением на ориентир. В приборах с неподвижным угловым полем это осуществляется перемещением следающего раstra в пределах углового поля, в приборах с подвижным полем — как перемещением следающего раstra по угловому полю, так и механическим перемещением всего углового поля.

Режим селекции (распознавания) рабочего источника имеет целью проверить, является ли обнаруженный объект или объект, за которым ведется слежение, рабочим ориентиром или помехой — шумовым выбросом фона, «светящейся частицей», звездой — помехой и т.п. Априорная информация, используемая при распознавании, — это прежде всего характеристики рабочего ориентира и параметры помех, вытекающие из принятой модели помех. Для распознавания используется ряд параметров — признаков селекции. Критерий оптимизации режима распознавания

может использоваться тот же, что и для поиска, — минимум времени, затрачиваемого на распознавание, при заданных вероятностях ложного обнаружения и пропуска рабочей звезды. Однако ввиду того, что этот режим занимает малую долю времени поиска или слежения, во многих случаях критерием выбора того или иного метода является не время распознавания, а простота реализации.

Сказанное о режиме распознавания относится только к распознаванию одиночных ориентиров. О распознавании групп звезд в звездных приборах следует сказать отдельно. Распознавание групп звезд включает, во-первых, распознавание каждой отдельной звезды из группы (т.е. селекцию каждой одиночной звезды на фоне помех) и, во-вторых, идентификацию обнаруженной и отселектированной группы звезд с той или иной группой звезд в звездном каталоге. Последняя часть задачи весьма трудоемка и требует значительных затрат машинного времени и других вычислительных ресурсов. Оптимизации процедур такого рода посвящены специальные работы, например [48].

Цель режима распознавания одиночного ориентира формулируется так же, как и цель этапа обнаружения при поиске. Разница состоит в априорной информации, имеющейся до начала анализа: при обнаружении не известен факт наличия источника излучения в наблюдаемом элементе, а при распознавании принимается гипотеза о том, что в наблюдаемом элементе есть некоторый источник излучения, необходимо провести анализ источника по ряду признаков. Поэтому способы пространственной обработки при обнаружении и распознавании в общем случае отличаются, хотя в некоторых случаях режим распознавания может совмещаться со вторым этапом обнаружения режима поиска.

Режим калибровки предназначается для определения систематических и медленно меняющихся составляющих погрешности с целью последующего их учета. Здесь речь может идти в равной степени о погрешностях как энергетических измерений, так и угловых измерений. Однако принципиальным является учет погрешностей именно угловых измерений, поскольку это напрямую касается основной характеристики прибора. Режим калибровки реализуется измерением координат изображений специальных калибрационных (опорных) меток, истинные координаты которых заранее известны с высокой точностью, определением поправок на основе этих измерений и учета этих поправок при последующей работе по ориентиру. Эти изображения меток формируются в плоскости анализа прибора введенным в его оптическую систему каналом геометрического эталона. Режим калибровки разделяется на поиск опорных меток и измерение их координат.

Поэтому характер обработки сигналов при калибровке определяется теми же требованиями, что и при поиске и измерении, с учетом особенностей опорных меток, — отсутствия движения, большей мощности излучения, специфики их формы (точечные или линейные метки), возможности введения дополнительных признаков (узкий спектр излучения, модуляция яркости и др.).

Правило соответствия пространственно-временной обработки и цели режима определяет не только способ построения аппаратуры и методы обработки информации в ней, но и способ контроля правильности заложенных технических решений и качества работ на том или ином этапе разработки. Согласно этому правилу цель режима определяет критерии оптимизации, в соответствии с которыми для каждого режима может быть установлен перечень параметров и характеристик, достаточно полный, чтобы оценить достижение этой цели. Совокупность таких параметров и характеристик на этапе проектирования определяет научно-технический уровень разработки (т.е. качество проектирования), а контроль за ними на этапе изготовления опытных образцов и испытаний позволяет оценить качество аппаратуры (т.е. качество техдокументации и изготовления). Неучет какого-либо параметра из указанной совокупности при оценке качества аппаратуры (например, при оценке чувствительности в режиме поиска неучет допустимого уровня помех или времени поиска, при оценке точности измерения — неучет допустимой скорости колебаний основания, на котором крепится прибор и т.п.) ведет к искаженному представлению о ней и не позволяет определить возможность ее использования в тех или иных условиях.

2.1.3. Правило относительного измерения

Правило относительного измерения вытекает из особенностей процесса измерения оптико-электронных астроприборов, основное назначение которых — определять угловые координаты светил в связанной с прибором системе координат с заданной точностью. Точность прибора есть качество, отражающее соответствие результатов его измерений действительным значениям измеряемой величины. С количественной стороны точность характеризуется погрешностью измерения, под которой понимается разность между измеренным и действительным значениями измеряемой величины. Погрешность каждого конкретного измерения неизвестна заранее и не может быть предсказана точно, поэтому она является случайной величиной. Как любую случайную величину, погрешность можно характеризовать различными характеристиками — математическим ожиданием, дисперсией, моментами

высших порядков, предельными значениями, вероятность не превышения которых равна $1 - 2p$. Весьма важно поведение погрешности астроприборов в течение срока эксплуатации. Чтобы узнать изменение погрешности во времени, необходимо рассматривать ее как случайный процесс. В этом случае характеристики погрешности (математические ожидания, дисперсии) в общем случае также будут переменными во времени.

Существенное свойство погрешностей, отражающее характер ее поведения во времени, описывается корреляционной функцией и временем корреляции. Погрешность прибора $\varepsilon(t)$, как любой случайный процесс, можно разложить на три составляющих, отличающиеся временем корреляции:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 + \varepsilon_1(t) + \delta(t),$$

где $\varepsilon(t)$ — полная погрешность — разность между действительной угловой координатой светила в системе координат, связанной с посадочным местом прибора, и показанием прибора; ε_0 — постоянная (систематическая) составляющая (случайное число); $\varepsilon_1(t)$ — коррелированный случайный процесс со временем корреляции не менее τ и нулевым математическим ожиданием; $\delta(t)$ — некоррелированный случайный процесс с нулевым математическим ожиданием.

Некоррелированный случайный процесс — понятие абстрактное; любой реальный процесс имеет конечное время корреляции. Поэтому на практике под некоррелированной составляющей понимают составляющую, время корреляции которой меньше некоторого характерного для прибора интервала времени T (например, интервал дискретности выдачи информации). В литературе эту составляющую иногда называют шумовой. Мы будем придерживаться этого названия. Под коррелированной составляющей будем понимать составляющую, время корреляции которой τ больше этого характерного интервала времени T . Трем названным составляющим погрешности соответствуют три группы факторов и физических процессов, которыми эти составляющие определяются.

Постоянная составляющая ε_0 определяется такими факторами, как точность установки прибора на КА, точность выполнения приборной системы координат, точность измерительных средств и методов, используемых при сборке и юстировке прибора и т.п. Если величину ε_0 измерить с достаточной точностью, то в дальнейшем при эксплуатации она может быть учтена и ее влияние на точность измерений исключено.

Коррелированная составляющая $\varepsilon_1(t)$ определяется прежде всего влиянием на конструктивные элементы и узлы прибора физических условий, в которых он работает: температуры, давления,

механических воздействий, излучений различного рода, влажности, срока службы и т.п. Эта составляющая связана также с изменением свойств материалов и узлов во времени при длительной эксплуатации (текучесть конструкционных материалов, износ механических деталей, выжигание фоточувствительного слоя фотоприемника, излучения, деградация параметров электрорадиоизделия и т.п.). $\epsilon_1(t)$ на интервале времени $\tau_1 < \tau$ приближенно постоянна. Если вначале такого интервала (в момент времени t_k) эту погрешность можно измерить какими-либо средствами, то далее в течение времени τ_1 ее можно учитывать. Повторяя периодически (с периодом τ_1) процедуру определения $\epsilon_1(t)$ (процедуру калибровки) в принципе возможно исключить влияние коррелированной составляющей погрешности на результат измерения.

Некоррелированная составляющая $\delta(t)$ определяется электрическими шумами фотоэлектрического тракта, дискретностью аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей, применяемыми методами обработки информации в приборе. Повышение точности ОЭП в целом достигается уменьшением всех трех составляющих погрешности. Однако существующие возможности этого неодинаковы для различных составляющих. Первые две составляющие в значительной степени связаны со свойствами материалов и уровнем нашего знания этих свойств, с технологией обработки материалов, с развитием метрологической базы и средств измерений. Исследования в этих областях требуют значительных трудозатрат и длительных испытаний, поэтому прогресс здесь идет достаточно медленно в сравнении с темпом создания новых ОЭП. Шумовая составляющая $\delta(t)$ связана со свойствами фотоприемников и электрорадиоизделий, с используемыми методами обработки информации. Совершенствование традиционных и создание новых типов фотоприемников, применение современных методов оптимальной обработки информации и последних достижений вычислительной техники позволяют существенно снизить эту составляющую погрешности. Снижение шумовой составляющей создает предпосылки для повышения точности прибора в целом: имея ОЭП с малой шумовой составляющей погрешности и средства для измерения остальных составляющих (для калибровки), можно в принципе выполнять измерения с высокой точностью, если периодически проводить калибровку.

Рассмотрим подробнее процесс измерения в ОЭП. Первичное измерение координат источника излучения выполняется в системе координат, связанной с анализатором изображения: в ОЭП с электронно-лучевыми трубками — в системе координат электронного раstra, в приборах с матричными приемниками —

в системе координат матрицы, в приборах с механическим сканированием — в системе координат, связанной с механическим модулятором. Точность измерения в этой системе координат может быть весьма высокой, особенно для ОЭП с электронным сканированием, благодаря тому, что для них характеристики пространственного фильтра анализатора могут быть хорошо согласованы с характеристиками изображения. Конечный результат необходимо выдавать в базовой системе координат, связанной с посадочным местом или базой ОЭП. Связь системы координат анализатора с базовой системой координат нестабильна, в сильной степени зависит от условий эксплуатации. Это относится в первую очередь к ОЭП с электронным сканированием, где погрешности связи двух указанных систем координат определяются такими факторами, как искажения и нестабильности электронного растра, нестабильности элементов конструкции фотоприемника (электронно-лучевой трубки, матрицы), элементов его крепления, нестабильностью конструкции фокусирующей и отклоняющей систем и т.п. Чтобы определить связь этих двух систем координат и применяется калибровка. Для ее выполнения в состав прибора вводят специальный оптический узел (канал геометрического эталона), создающий в плоскости анализа (в фокальной плоскости объектива) изображение калибрационных отметок. Узел калибрационных отметок реализует в пространстве предметов оптической системы промежуточную опорную систему координат (систему координат калибрационных отметок), которая гораздо более точно может быть связана с базой (с базовой системой координат), чем система координат фотоприемника. При наличии такой промежуточной системы координат фотоизмерительная система ОЭП выполняет лишь относительные измерения — определяет положение изображения ориентира относительно изображения калибрационных отметок. Положение последних относительно базовой системы известно заранее и сохраняется с высокой точностью.

Изложенный подход к построению ОЭП созвучен методу калибровки по опорным точкам, применяемым в фотосъемке [38], и широко используется в ОЭП с электронным сканированием [46]. Имеются предложения по его использованию в приборах других типов. Этот подход может быть сформулирован в виде правила, которое назовем правилом относительного измерения: для высокоточного измерения угловых координат источников излучения в ОЭП необходимо вводить промежуточную опорную систему координат калибрационных отметок, положение которой относительно базовой системы координат прибора жестко фиксировано, и с помощью анализатора производить измерения координат ориентиров относительно изображений калибрационных отметок.

Согласно этому правилу, в ОЭП выделяют три системы координат: базовую, систему координат фотоприемника (или анализатора) и опорную промежуточную систему координат калибрационных меток. Соответственно этому все составляющие погрешности измерений ОЭП относятся либо к одной из названных систем координат, либо к связям между ними и могут быть разделены на следующие группы:

- погрешности измерений относительно системы координат фотоприемника;
- погрешности связи системы координат фотоприемника с опорной системой координат калибрационных меток;
- погрешности опорной системы координат калибрационных меток;
- погрешности связи опорной системы координат калибрационных меток и базовой системы координат;
- погрешности базовой системы координат.

Таким образом, правило относительного измерения определяет общий подход к построению модели погрешностей ОЭП, а также указывает реальный путь повышения точности измерений с помощью ОЭП — это снижение шумовой составляющей его погрешности и разработка средств и методов калибровки, позволяющих учитывать коррелированную составляющую погрешности.

Это правило можно распространить на совокупность приборов КА, которые выполняют угловые измерения, и средств, для работы которых требуется точная «привязка» их к астроориентирам (например, телескопа, исследующего астрономические объекты) [66]. При этом роль промежуточной системы координат при калибровке взаимного положения осей должны выполнять какие-либо внешние ориентиры, координаты которых известны с высокой точностью (например, звезды). При разработке высокоточных систем управления для калибровки вышеуказанных приборов и средств необходимо предусматривать специальные режимы работы и алгоритмы. При разработке ОЭП для высокоточных систем управления необходимо устанавливать такой состав нормируемых точностных характеристик, который позволит разработчикам систем правильно оценить точность системы и выбрать период калибровки ОЭП.

С учетом вышеизложенных соображений и опыта разработки и испытаний ОЭП представляется целесообразным установить следующие точностные характеристики ОЭП, подлежащие нормированию при разработке и в производстве:

- среднее квадратическое отклонение шумовой составляющей σ_{δ} — при испытаниях оценивается по контрольной выборке

необходимого объема при имитации воздействий условий эксплуатации;

- изменение (дрейф) математического ожидания погрешности Δm_ϵ — приращение математического ожидания контрольной выборки на интервале времени, сравнимом с временем корреляции τ ; должна устанавливаться норма на максимальное значение Δm_ϵ при действии условий эксплуатации;
- полная предельная погрешность Δ — такая величина, что любой отсчет из контрольной выборки не превышает ее с вероятностью $1 - 2p$ (т.е. $\Delta - p$ — квантиль полной погрешности $\epsilon(t)$).

Такой состав точностных характеристик приборов позволяет проектировать систему управления КА с учетом особенностей отдельных составляющих полной погрешности, что в конечном счете дает возможность повысить точность всей системы.

2.2. Организация режимов работы в приборах ориентации и навигации КА

2.2.1. Режим измерения

Режим измерения — основной режим работы астроприборов, именно в этом режиме решается основная задача — измерение координат ориентиров в системе координат, связанной с базой прибора, и передача результатов этих измерений в систему управления КА. Во время работы прибора в режиме измерения решается также вторая задача — периодическая проверка и подтверждение того, что измеряются координаты нужного источника, а не помехи (подтверждение наличия ориентира); если это не подтверждается (произошла потеря ориентира), то выдается соответствующий сигнал.

Рассмотрим вначале вопросы построения измерительной цепи и измерительных алгоритмов. Из теории приема сигналов [64, 65] следует, что для оптимизации фильтрации по критерию минимума среднего квадратического отклонения погрешности необходимы следующие процедуры обработки информации в режиме измерения:

- Квазиоптимальный процесс обработки в целом строится по принципу следящей системы и включает три этапа:
 - пространственную обработку — обработку сигналов от каждого элемента пространства, которая заключается в умножении сигнала от каждого элемента на весовой коэффициент и последующем суммировании по всем элементам; значения весовых коэффициентов для различных точек пространства различны; совокупность весовых коэффициентов, рассматри-

ваемую как функция точек пространства, будем называть функцией прозрачности пространственного фильтра;

- временную обработку — пропускание сигнала через линейные и нелинейные электрические цепи с переменным коэффициентом передачи, в результате формируется оценка неизвестной координаты на текущий момент времени;
- изменение характеристик пространственного фильтра и электрических цепей для приведения их в соответствие с полученной оценкой; в простейшем случае это может быть просто перемещение зоны прозрачности пространственного фильтра вслед за изменяющимися координатами источника излучения.

• Функция прозрачности устройства, выполняющего пространственную обработку (пространственного фильтра), изменяется во времени: во-первых, область прозрачности фильтра смещается вслед за перемещением источника излучения относительно базы прибора; во-вторых, меняется размер зоны прозрачности и характер изменения коэффициента передачи в ней — в начале измерения эта зона достаточно широка, затем по мере уточнения координат источника она уменьшается до величины, определяемой областью, где производная сигнала по координате ($\partial\lambda/\partial x$) отлична от нуля; эволюция функции прозрачности квазиоптимального пространственного фильтра в процессе измерения изображена на рис. 2.1.

• Характер временной обработки определяется характером изменения во времени координат источника излучения относительно базы прибора: электрический фильтр формирования оценки повторяет модель возмущающего воздействия по координате так же, как при фильтрации Калмана–Бьюси.

Схема квазиоптимальной пространственно-временной обработки сигнала представлена на рис. 2.2. На этой схеме $N(\Delta t, \Delta\xi)$ — результат накопления сигнала в элементе пространства $\Delta\xi$ в течение временного интервала Δt ; $\lambda(\xi_i - \hat{X}_t)$ — ожидаемое распределение интенсивности излучения по пространственной координате ξ ; $\hat{X}_t$ — оценка положения источника излучения в момент времени t ; $\lambda'(\xi_i - \hat{X}_t)$ — производная от $\lambda(\xi_i - \hat{X}_t)$ по параметру ξ_i ; c — скорость перемещения источника излучения. В этой схеме блоки,

обозначенные дробью $\frac{\lambda'(\xi_i - \hat{X}_t)}{\lambda(\xi_i - \hat{X}_t)}$, выполняют функцию умножения результата наблюдения $N(\Delta t, \Delta\xi)$ на эту дробь (т.е. выполняют пространственную обработку). Остальные блоки, функции которых ясны из их названия, замыкают цепь обратной связи следящей системы, отслеживающей положение источника излучения и определяющей его оценку $\hat{X}_t$. Блок вычисления

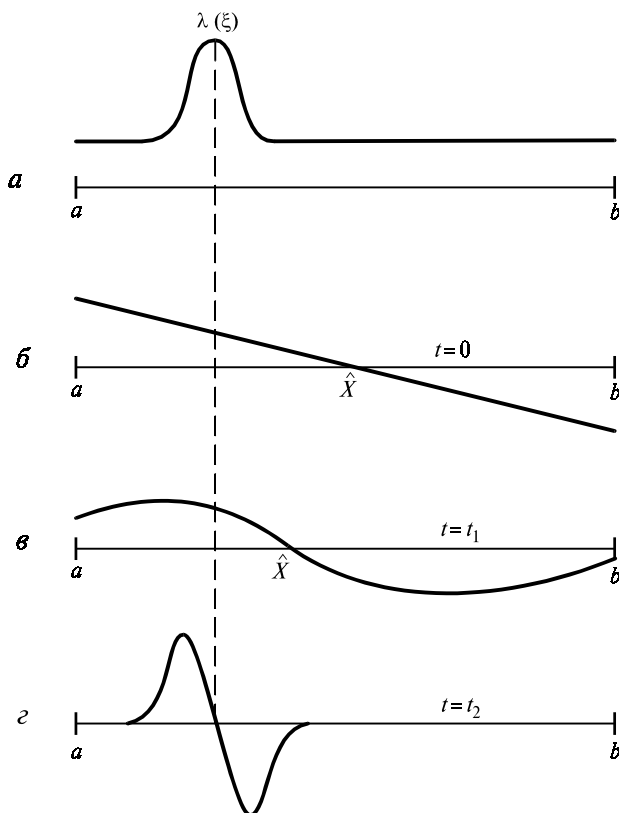


Рис. 2.1. Эволюция функции прозрачности пространственного фильтра: *a* — распределение интенсивности излучения $\lambda(\xi)$ на отрезке $[a, b]$; *б, в, г* — функция прозрачности пространственного фильтра на отрезке $[a, b]$ в моменты времени $t=0, t_1, t_2$

ковариаций вычисляет дисперсию оценки $\hat{X}_t$ в каждый момент времени и пропорционально этой дисперсии изменяет усиление в цепи обратной связи. На практике пространственный фильтр с той или иной функцией прозрачности реализуется одним из двух способов:

- одновременный (параллельный) обзор всех элементов в зоне прозрачности пространственного фильтра и последующее суммирование сигналов с соответствующими весовыми коэффициентами выполняется фотоприемниками типа квадрантных фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), матриц прибора с зарядовой связью (ПЗС), передающих телевизионных трубок с накоплением; период съема информации с приемника практически совпадает со временем наблюдения для одного элемента;

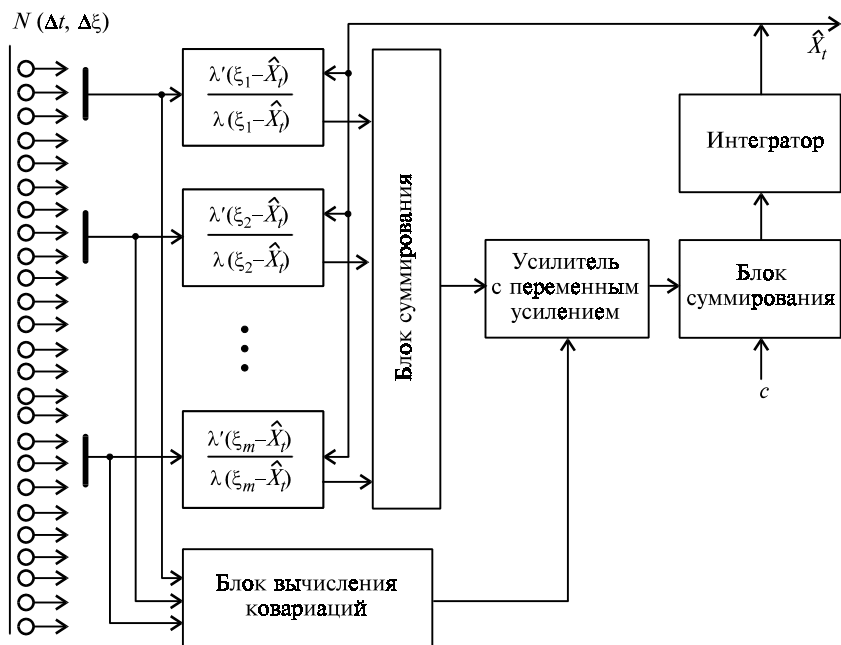


Рис. 2.2. Схема пространственно-временной квазиоптимальной обработки сигнала в режиме измерения

- поочередный обзор элементов в зоне прозрачности — сканирование и такое же взвешенное суммирование реализуется фотоприемниками типа диссектор либо в различных вариантах оптико-механического сканирования, период съема информации с приемника равен сумме времен наблюдения для каждого элемента.

В отличие от квазиоптимального способа обработки, в практических схемах, реализуемых аппаратно, как правило, применяются пространственные фильтры с неизменной во времени функцией прозрачности в пределах зоны прозрачности (изменяется только положение зоны прозрачности относительно базы прибора, реализуется так называемый следящий фильтр), а также электрические фильтры с постоянными коэффициентами. Это приводит к необходимости компромисса между размерами зоны удержания и захвата, с одной стороны, и величиной флуктуационной ошибки — с другой; однако при этом существенно упрощается аппаратная реализация соответствующих устройств.

Если обработка сигналов ведется программно, то возможна реализация фильтров и с переменными параметрами. Для этого требуются дополнительные вычислительные ресурсы (машинное время и память), но это может дать значительный положительный

эффект, если выбрать подходящий компромисс между динамической и шумовой составляющими погрешности.

При выборе параметров следящих пространственных фильтров, измеряющих координаты ориентиров, необходимо руководствоваться следующими результатами, полученными в теории приема сигналов:

- при реализации пространственного фильтра с помощью сканирования минимальная погрешность измерения достигается в случае эффективного сканирования согласованной апертурой (см. [63]);
- при реализации пространственного фильтра с помощью дискретной матричной структуры с параллельным обзором элементов размеры изображения и элементов матрицы должны быть взаимно согласованы (условия согласования приведены в [61]);
- значение шумовой погрешности, полученное при определении углового рассогласования с помощью того или иного варианта сканирования, может отличаться в несколько раз (для точечного источника излучения это наглядно показано в [47]).

Для подтверждения факта слежения за нужным ориентиром (подтверждения наличия) в режиме измерения периодически должен повторяться контроль (прямой или косвенный) тех параметров изображения отслеживаемого источника, по которым осуществляется селекция его на фоне помех: интенсивности сигнала, углового размера, скорости перемещения и др. Измерение этих параметров может выполняться либо без изменения закона сканирования, либо использованием специальных законов сканирования. (Вопросы построения алгоритмов обработки для этих случаев рассмотрены ниже в разделе, посвященном распознаванию целей.)

2.2.2. Режим селекции рабочего источника

Режим селекции (распознавания) является составной частью режимов поиска и измерения. Цель режима — удостовериться, что обнаруженный источник излучения или источник, за которым осуществляется слежение, является рабочим ориентиром, и выдать соответствующий сигнал. Селекция на фоне помех осуществляется и при обнаружении; отличие режима распознавания состоит в том, что при оптимизации обнаружения в качестве источника внешних световых помех принимается распределенный фон, при распознавании — сосредоточенные помехи.

Режим селекции с той или иной степенью использования возможных средств реализуется во всех типах астроприборов.

Наибольшим разнообразием применяемых способов селекции отличаются звездные приборы, поскольку они в наибольшей степени подвержены воздействию помех. При этом способы селекции рабочих ориентиров в солнечных и земных приборах могут рассматриваться как разновидности (или модификации) аналогичных способов, применяемых в звездных приборах. Учитывая это обстоятельство, мы достаточно подробно рассмотрим вопросы селекции ориентиров для звездных приборов, а затем отметим особенности подходов к этим вопросам в приборах других типов.

В звездных приборах селекция звезд на фоне сосредоточенных помех может выполняться по ряду признаков [77]:

- по энергии (по уровню сигнала);
- по дальности;
- по угловой скорости;
- по угловому положению относительно других астрономических объектов;
- по оптическому спектру;
- по форме совокупного изображения звезды и помехи;
- по приращению измеряемых параметров.

Чем больше параметров, отличающих рабочие звезды и помехи, известно, тем больше признаков может быть использовано для селекции, тем эффективнее будет селекция. Если по какому-либо параметру сигнала рабочей звезды или помехи сведения отсутствуют, то соответствующий ему признак не может быть использован для селекции.

Наиболее часто применяемые и вместе с тем достаточно эффективные это признаки 1–4. Селекция по оптическому спектру присутствует при всех измерениях, однако ввиду того, что спектры излучения рабочих звезд и помех весьма широки и пересекаются, эффективность этого вида селекции не высока.

Помехозащищенность ОЭП по отношению к сосредоточенным помехам характеризуется вероятностью ложного захвата помехи и вероятностью пропуска звезды из-за наличия помехи. Однако, если для определения вероятностей ошибочных решений при помехах в виде распределенного фона достаточно задать лишь его яркость (а в некоторых случаях еще и градиент), то при помехах типа «светящихся частиц», чтобы определить вероятности ошибок, необходимо знать вероятностное распределение их по всем параметрам, которые используются для селекции: по размерам, дальности от ОЭП, скорости, блеску и т.п. Поскольку в настоящее время для большинства КА статистической модели помех типа «светящихся частиц» не существует, то вероятности ошибочных решений для сосредоточенных помех могут

быть заданы только как условные вероятности в следующей форме: вероятность ложного захвата сосредоточенной помехи и вероятность пропуска звезды из-за воздействия помехи не должны превышать величин α и β соответственно при условии, что параметры помехи лежат в заданных пределах. Задание требований в виде условных вероятностей позволяет:

- оценить помехозащищенность ОЭП по отношению к сосредоточенной помехе с конкретными параметрами;
- сравнивать между собой различные ОЭП при одних и тех же параметрах помех;
- после создания модели помеховой обстановки определить безусловные вероятности ошибочных решений.

Селекция по энергии основана на том, что интенсивность излучения большинства звезд, используемых для работы в ОЭП, известна с достаточно высокой точностью, так что можно указать определенный диапазон уровней сигнала звезды, принимаемого прибором. Этот диапазон определяется как точностью знания светового сигнала от звезды, так и погрешностями его измерения прибором. Последние определяются такими факторами, как разброс спектральных характеристик фотоприемника и оптики, нестабильность чувствительности в условиях эксплуатации, неравномерность чувствительности по угловому полю, погрешность имитации сигнала звезды при настройке прибора, шумы фотоэлектронного тракта и т.п. Результирующая погрешность измерения блеска звезды достигает 0,7–0,8 звездной величины; применение специальных схем автоматической регулировки чувствительности по опорным источникам излучения (радиolumинисцентный излучатель (РЛИ), лампы накаливания, светодиоды) позволяет снизить ее до 0,3–0,5 звездной величины, а при работе по отдельным звездам — до 0,2–0,3 звездной величины. Точность знания блеска для наиболее ярких непременных звезд около 0,1 звездной величины. Чем слабее звезды, тем больше среди них переменных, для которых указывается диапазон изменения блеска. Размер этого диапазона может быть значительным.

В сканирующих звездных приборах измерение уровня светового сигнала от звезды можно выполнять в тех же режимах сканирования, что и при слежении (линейное крестообразное сканирование, растр типа «двойной крест», розеточный растр [47]), либо применяя специальный закон сканирования. Точность измерения сигнала во всех случаях примерно одинакова, и определяющим в выборе закона сканирования являются требования по точности угловых измерений. Общее соображение при выборе типа пространственной обработки состоит в том, что для уменьшения влияния помех на точность измерения размер просмат-

риваемой зоны должен быть минимальным. (Конкретное выражение для ошибок измерения при том или ином законе сканирования можно найти в [47].)

Селекция по энергии применяется так же как один из основных видов селекции сигнала рабочей звезды от сигналов звезд-помех.

Селекция по дальности основана на том, что световые помехи типа «светящихся частиц» создаются источниками, находящимися на конечном расстоянии от ОЭП, в отличие от практически бесконечно удаленных звезд. В результате изображение помехи в плоскости анализа ОЭП имеет размеры, превышающие размеры изображения звезды. Кроме того, могут использоваться специальные оптические системы (бинокулярные, с кольцеобразным входным зрачком и т.д.), в которых изображения звезд и помех отличаются не только по размерам, но и по форме распределения освещенности. В таких системах изображение помехи может иметь форму кольца, двух пятен и т.п., что облегчает селекцию, так как появляется дополнительный признак — форма изображения. Для систем с круглым входным зрачком точечная помеха, расположенная на конечном расстоянии от ОЭП, создает дефокусированное круглое изображение в фокальной плоскости, диаметр которого тем больше, чем ближе «светящаяся частица» к входному зрачку прибора. (Количественные соотношения для этого случая приводятся в разд. 3.2.3.) Таким образом, для ОЭП, в котором используется оптическая система с круглым входным зрачком, селекция по дальности вырождается в селекцию по размеру изображения.

Измерение размера изображения с целью селекции может выполняться как при поиске путем измерения длительности импульса сигнала, так и при слежении. В последнем случае эффективность селекции зависит от того, какой тип пространственной обработки используется. Как и при измерении углового рассогласования [47], целесообразно использовать специальные растры в форме процедур сканирования (для приборов со сканированием) или матрицы весовых коэффициентов (для матричных приемников).

Селекция по угловой скорости выполняется практически во всех ОЭП, так как любой ОЭП может работать лишь по такому источнику, скорость перемещения которого в угловом поле не превышает некоторой предельной. Такой вид селекции будем называть естественной селекцией. Во многих случаях бывает известна достаточно точно угловая скорость движения звезды в угловом поле (например, в солнечно-звездной системе ориентации, когда КА вращается с постоянной скоростью вокруг оси, направленной на Солнце, или когда КА стабилизирован в орбитальной системе координат и звезда перемещается в угловом поле со скоростью, равной орбитальной скорости движения КА).

Поскольку помехи типа «светящихся частиц» имеют достаточно широкий диапазон угловых скоростей, то, определив скорость перемещения наблюдаемого источника в угловом поле ОЭП, можно отбраковывать те помехи, которые имеют скорости, отличающиеся от скорости перемещения рабочей звезды. Скорость определяется через разность двух последовательных во времени измерений угловых координат:

$$v = \frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\Delta t},$$

где φ_1, φ_2 — два последовательных отсчета, отстоящие на время Δt один от другого.

Поэтому эффективность селекции по скорости зависит от шумовой составляющей погрешности измерения угловых координат прибором, а также от точности знания скорости перемещения звезды в угловом поле.

Вероятностные характеристики селектора по скорости можно оценить следующим образом. Из приведенного соотношения для v следует, что среднее квадратическое отклонение погрешности измерения скорости σ_v равно (при статистически независимых отсчетах φ_1, φ_2)

$$\sigma_v = \frac{\sigma_\varphi \sqrt{2}}{\Delta t},$$

где σ_φ — среднее квадратическое отклонение погрешности (угловой шум) измерений координат φ_1, φ_2 .

Пусть известно, что звезда может перемещаться в угловом поле со скоростью, лежащей в диапазоне $[v_1, v_2]$. Для того чтобы вероятность пропуска звезды селектором не превышала β_v , достаточно выбрать пороги селекции по скорости Π_{v_1}, Π_{v_2} :

$$\begin{aligned} \Pi_{v_1} &= v_1 - \gamma_1 \frac{\sigma_\varphi \sqrt{2}}{\Delta t}, \\ \Pi_{v_2} &= v_2 + \gamma_2 \frac{\sigma_\varphi \sqrt{2}}{\Delta t}, \end{aligned}$$

где $\gamma_1 = \Phi^{-1}(1 - 0,5\beta_v)$ — функция, обратная интегралу вероятностей. Тогда вероятность ложного захвата помехи, имеющей скорость $v < v_1$, равна

$$\alpha_v = P\{v + \delta_v > \Pi_{v_1}\} = 1 - \Phi\left(\frac{v_1 - v}{\sigma_\varphi \sqrt{2}} \Delta t - \gamma_1\right).$$

Если $v > v_2$, то

$$\alpha_v = P\{v + \delta_v < v_2\} = \Phi\left(\frac{v_2 - v}{\sigma_\phi \sqrt{2}} \Delta t + \gamma_1\right),$$

где δ_v — погрешность измерения скорости, рассматриваемая как гауссовская случайная величина с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_v^2 . Объединяя полученные результаты, можем записать

$$\alpha_v = \begin{cases} 1 - \Phi\left(\frac{v_1 - v}{\sigma_\phi \sqrt{2}} - \gamma_1\right), & v < v_1, \\ \Phi\left(\frac{v_2 - v}{\sigma_\phi \sqrt{2}} + \gamma_1\right), & v > v_2. \end{cases}$$

Скорость перемещения помех, которые с вероятностью α_v не будут восприниматься прибором, определится соотношениями

$$v_{1\Pi} = v_1 - (\gamma_2 + \gamma_1) \frac{\sigma_\phi \sqrt{2}}{\Delta t},$$

$$v_{2\Pi} = v_2 - (\gamma_1 + \gamma_2) \frac{\sigma_\phi \sqrt{2}}{\Delta t},$$

где $\gamma_2 = \Phi^{-1}(1 - 0,5\alpha_v)$. Например, если принять, что скорость перемещения звезды равна $(0,4 \pm 0,1)$ град/с, $v_1 = 0,3$ град/с, $v_2 = 0,5$ град/с, $\sigma_\phi = 0,3'$, $\Delta t = 0,2$ с, $\alpha_v = \beta_v = 0,003$, то получим $\gamma_1 = \gamma_2 = 3$, $\sigma_v = 2,2$ угл. мин/с, $v_{1\Pi} = 0,08$ град/с, $v_{2\Pi} = 0,72$ град/с.

Как показывает практика, применение в ОЭП только селекции по скорости не позволяет полностью избавиться от влияния помех, ее применение оправдано в совокупности с другими методами селекции.

Селекция по угловому положению относительно других астрономических объектов в различных видах широко применяется в звездных ОЭП. К простейшему виду селекции этого типа можно отнести процедуру наведения углового поля ОЭП на рабочую звезду, поскольку наведение осуществляется в системе координат, в той или иной мере связанной с астрономическими объектами: с направлением местной вертикали, с направлением на Солнце и т.д. При работе ОЭП после наведения его углового поля на рабочую звезду полностью исключается влияние помех, находящихся вне углового поля (если эта помеха не настолько сильная, что может создать вторичные помехи — рассеянный свет и блики в оптической системе). Эффективность при этом

тем выше, чем меньше угловое поле. Аналогичное положение имеет место при слежении за звездой с помощью следящих стробов, когда помехи, не попадающие в следящий строб, практически не влияют на работу прибора.

Вторая разновидность этого типа селекции — ОЭП с подвижным угловым полем поочередно работает по различным звездам и при работе по очередной звезде используется информация, полученная при работе по предыдущей звезде. В этом случае зона поиска новой звезды может быть сужена до размеров, определяемых погрешностью углового измерения самого прибора. Влияние помех, находящихся за пределами зоны поиска, практически полностью исключается.

Наконец, третья разновидность этого типа селекции — в угловом поле прибора заводятся изображения нескольких звезд или звезды и Солнца. Благодаря этому удастся уменьшить зону поиска рабочих звезд и повысить помехозащищенность.

Реализация селекции последних двух разновидностей связана с усложнением в ОЭП как схемно-конструктивных решений, так и обработки информации. Однако ввиду высокой эффективности этих видов селекции дополнительные затраты и усилия оправданы. Примеры практической реализации селекции этого типа рассмотрены ниже.

Как показывает практика, применение селекции перечисленных видов позволяет с малыми вероятностями ошибок селектировать звезды на фоне помех в режиме измерения длительностью ~ 1 ч. Если режим измерения продолжается десятки часов, вероятность того, что найдется помеха, сигнал от которой по всем параметрам, включая направление прихода, близок к сигналу от рабочей звезды, весьма велика. Поэтому в таких случаях требуется привлечь более сложные методы селекции. К таким методам относится селекция по приращениям изменяемых параметров и по форме совокупности изображений звезды и помехи.

Сущность метода селекции по приращению параметров основана на том, что при попадании помехи в следящий растр происходит скачок выходных сигналов устройств, измеряющих уровень сигнала, скорость и координаты звезды. Этот скачок может быть использован для формирования сигнала помехи и запрета выдачи информации.

Сущность селекции по форме совокупности изображений звезды и помехи состоит в том, что, если вблизи направления на звезду находится помеха, сигнал от которой по всем параметрам близок к сигналу звезды, то совокупное изображение будет иметь вид двух точек. Однако усложняет выполнение задачи селекции то обстоятельство, что изображение помехи может находиться в пределах следящего растра, так что сигнал от обоих источников воспринимается как один сигнал. В такой ситуации самое боль-

шое, что можно потребовать от ОЭП, это, чтобы он различал наличие помехи и выдавал сигнал, свидетельствующий о вероятном ее захвате, по прошествии же времени, достаточного для расхождения звезды и помехи на расстояние, большее углового разрешения, прибор продолжал бы следить за рабочей звездой.

Таким образом, задача разделяется на две части:

- определить момент, когда помеха попала в пределы следящего раstra и выработать сигнал о вероятном захвате помехи;
- проверить, что звезда и помеха разошлись на расстояние, большее углового разрешения ОЭП, и вернуться к слежению за звездой.

В приборах, работающих по группе звезд, появляются дополнительные возможности селекции рабочих звезд на фоне «светящихся частиц». Осуществляя слежение за группой из 5–10 звезд, возможно без большого ущерба для измерения угловых координат отказаться от использования информации от одной из звезд на то короткое время, когда близко к ней подошла «светящаяся частица». Для этого необходимо лишь распознать, что такой «подход» помехи произошел.

Вернемся к вопросам селекции в приборах других типов — солнечных и земных. В солнечных приборах источником помех, приближающимся по яркости создаваемых сигналов к Солнцу, могут быть освещенная Солнцем Земля или элементы конструкции КА, также освещенные Солнцем. Последние необходимо при размещении прибора на КА выносить за пределы поля обзора приборов. Что касается Земли, то от ее влияния удастся избавиться с помощью простейшей пороговой селекции по сигналу. Похожая картина и в земных приборах ИК-диапазона с той разницей, что в качестве помехи выступает Солнце. Сигнал от Солнца в рабочем спектральном диапазоне земных приборов превышает сигнал от Земли как минимум на порядок, поэтому пороговая селекция может использоваться по принципу отбраковки большого сигнала. Учитывая, что для околоземных орбит угловой размер Земли на порядок превышает угловой размер Солнца, здесь также эффективно работает селекция по угловому размеру.

Более сложные способы селекции, описанные в применении к звездным приборам, для земных и солнечных приборов обычно не требуются.

Для земных ИК-астроприборов наиболее опасная ситуация возникает когда часть Солнца выходит из-под диска Земли. В этом случае пороговые методы селекции могут не сработать. Для борьбы с подобными ситуациями идут на усложнение прибора, в который вводят солнечный канал и усложняют работу его сканирующей системы (см. разд. 3.2.1).

2.2.3. Режим поиска

Рассмотрим режим поиска на примере звездных приборов. Из теории поиска (или многоальтернативного обнаружения, см., например, [43, 62]) вытекает, что достижение сформулированной выше цели поиска — подтверждения наличия звезды в поле обзора и первоначального грубого определения ее координат — связано с необходимостью выполнения следующих трех функций:

- просмотр всех элементов в поле обзора по тому или иному закону (сканирование);
- оценивание фона в процессе этого сканирования с целью последующего вычитания из регистрируемого сигнала;
- решение задачи обнаружения при анализе каждого элемента.

Кроме того, возможность присутствия в поле обзора, кроме рабочих ориентиров, и сосредоточенных помех приводит к необходимости выполнения еще одной функции — селекции рабочих ориентиров на фоне сосредоточенных помех. Последняя функция рассматривалась в предыдущем разделе, поэтому остановимся на функциях, выполняемых при поиске в условиях распределенного фона.

Решение задачи обнаружения, как известно, состоит в вычислении отношения правдоподобия и сравнении его с порогом. В астроприборах при анализе поля оптических сигналов, порожденного излучением рабочих ориентиров и мешающего фона, эта процедура сводится к тому, что в процессе наблюдения в каждом элементе сигнал должен накапливаться в течение некоторого времени анализа и сравниваться с порогом (или порогами), зависящим от мешающего фона [62]. Схема квазиоптимального обнаружения показана на рис. 2.3. В этой схеме: $N(\Delta t, \Delta \xi_i)$ — результат накопления сигнала в элементе пространства $\Delta \xi_i$ в течение времени Δt (например, путем пропускания сигнала фотоприемника через согласованный фильтр или его интегрирования в течение времени Δt); $\hat{\Lambda}_{pi}$ — оценка помех в элементе $\Delta \xi_i$ пространства. Под согласованным фильтром подразумевается электрический фильтр, полоса пропускания которого согласована с полосой частотного спектра сигнала от ориентира. Пороговое устройство может содержать один или два порога в зависимости от принятой процедуры обнаружения (см. ниже). Варианты построения фильтра оценки фона также рассмотрены ниже. Здесь важно отметить необходимость наличия в обнаружителе блока оценивания помех.

Решение задачи обнаружения при анализе каждого элемента поля обзора с минимальной средней затратой времени имеет место при последовательной (двухпороговой) процедуре обнаружения (обнаружитель Вальда) [9]. Применительно к обнаруже-

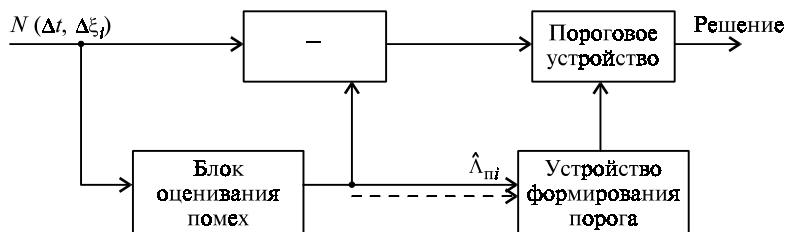


Рис. 2.3. Схема квазиоптимального обнаружителя

нию в астроприборах процедура Вальда состоит в накоплении сигнала за время анализа и сравнении его с двумя порогами, определяемыми вероятностями ошибочных решений. Спецификой последовательного обнаружения является случайный характер времени анализа в каждом элементе и всего времени поиска в целом. Полное время поиска ввиду большого числа элементов имеет относительно небольшой разброс. Преимущество последовательного обнаружения также и в том, что в нем автоматически меняется время анализа при изменении интенсивности фона, тем самым осуществляется адаптация к изменению условий обнаружения.

Процедуре поиска с последовательным обнаружением несколько уступает по эффективности двухэтапная процедура [58], которая благодаря простоте реализации широко применяется в ОЭП. В двухэтапной процедуре время анализа каждого элемента может принимать два значения: $t^{(1)}$ или $t^{(1)} + t^{(2)}$, где $t^{(1)}$, $t^{(2)}$ — время анализа на первом и втором этапах соответственно, причем время $t^{(1)} + t^{(2)}$ затрачивается достаточно редко, только если на первом этапе произошло превышение порога. В целом время поиска во всем поле обзора также является случайной величиной, но благодаря тому, что время анализа каждого элемента принимает всего два значения, реализация двухэтапной процедуры значительно упрощается по сравнению с последовательной.

Поиск с фиксированным временем анализа элемента применяется как составная часть двухэтапной процедуры, а как самостоятельный вид поиска практически не используется. Эта процедура в литературе служит также эталоном для оценки эффективности других поисковых процедур, которую определяют как выигрыш во времени по отношению к процедуре с фиксированным временем анализа. Так, двухэтапная процедура в реальных условиях дает выигрыш до 1,5–2 раз, последовательная — до 5–6 по отношению к процедуре с фиксированным временем.

В тех случаях, когда по условиям задачи возможно варьировать угловой размер сканирующей апертуры (например, при реализации поисковой траектории путем сочетания механического и электронного сканирования) необходимо иметь в виду

следующее. В общем случае чем больше угловой размер сканирующей апертуры, тем меньше время, затрачиваемое на поиск [57], т.е. тем выше эффективность поиска в смысле выбранного критерия, однако тем хуже точность определения координат цели. При большом уровне шума эта зависимость слабая.

При любой процедуре обнаружения из-за возможной неравномерности фона в пределах углового поля в процессе осмотра элементов должно выполняться оценивание фона. Процедура квазиоптимального оценивания связана с запоминанием большого количества информации и требует знания корреляционной функции фона. Однако, чтобы точность оценивания фона практически не влияла на достоверность обнаружения, достаточно, чтобы дисперсия оценки фона была в несколько раз меньше дисперсии сигнала звезды, накопленного за время анализа элемента. Дальнейшее повышение точности оценивания фона практически не влияет на эффективность обнаружения. Поэтому для оценки фона целесообразно применять упрощенные способы. При аппаратной реализации обнаружителей наиболее широко применяется оценивание с помощью интегрирующей RC -цепи (рис. 2.4). Оценка фона в такой цепи при неравномерном фоне является смещенной. На рис. 2.4 показаны два варианта таких устройств, $n(t)$ — сигнал, поступающий с фотоприемника, RC -фильтр — фильтр оценки фона. В варианте на рис. 2.4, *а* дифференцирующий RC -фильтр выполняет роль интегрирующего фильтра для сигнала фона и одновременно функцию вычитания полученной оценки фона из $n(t)$, в варианте на рис. 2.4, *б* благодаря частичной компенсации задержек уменьшается смещение оценки, так что при неравномерном фоне этот вариант предпочтительнее.

При реализации обнаружителя в виде программы на ЭВМ можно использовать экспоненциальный цифровой фильтр либо пространственный фильтр типа скользящего среднего. В первом случае оценка фона в i -м элементе определено уравнениями

$$\begin{aligned}\hat{\Lambda}_{0i} &= \hat{\Lambda}_{0i}^{\vartheta} + \alpha_c \left(\frac{N_i}{t_i} - \hat{\Lambda}_{0i}^{\vartheta} \right), \\ \hat{\Lambda}_{0i}^{\vartheta} &= \hat{\Lambda}_{0i-1} + \hat{\Lambda}_{0i-1} t_i, \\ \hat{\Lambda}_{0i} &= \hat{\Lambda}_{0i-1} + \frac{\beta_c}{t_i} \left(\frac{N_i}{t_i} - \hat{\Lambda}_{0i}^{\vartheta} \right),\end{aligned}$$

где $\hat{\Lambda}_{0i}$ — оценка фона в i -м элементе; $\hat{\Lambda}_{0i}^{\vartheta}$ — экстраполированные значения оценок фона в i -м элементе; $\hat{\Lambda}_{0i}$ — оценка скорости изменения фона в i -м элементе при сканировании; N_i — результат измерения наблюдаемого поля в i -м элементе; t_i — время наблюдения в i -м элементе; α_c ; β_c — коэффициенты сглаживания.

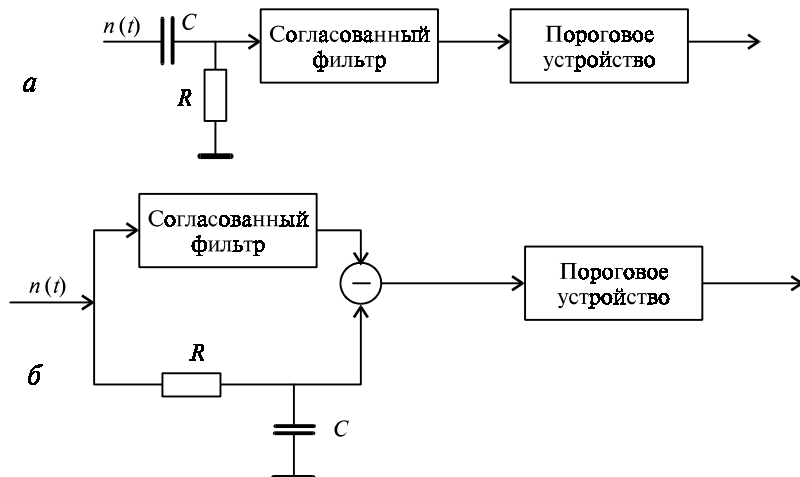


Рис. 2.4. Варианты реализации обнаружителя с оценкой фона на RC -цепи с последовательным (а) и параллельным (б) включением фильтра оценки фона

В случае применения фильтра типа скользящего среднего [13], использующего результаты измерений в семи элементах, за статистику, которая сравнивается с порогом на i -м шаге, принимается величина

$$\hat{\Lambda}_{1j} = \frac{N_{i-2} + N_{i-3} + N_{i-4}}{3} - \frac{N_i + N_{i-1} + N_{i-5} + N_{i-6}}{4}.$$

Здесь первая дробь играет роль оценки суммарного полезного сигнала и фона, вторая — оценки фона. Изменяя количество элементов, результаты измерения в которых используются для формирования оценок полезного сигнала и фона, аналогично можно строить фильтры с другим общим количеством запоминаемых отсчетов.

Оба типа фильтров дают близкие результаты и отличаются лишь вычислительной процедурой и количеством запоминаемой информации. На точность оценивания фона в сканирующих приборах существенно влияет характер сканирования, т.е. закон, по которому сканирующая апертура перемещается в поле обзора. Выбор того или иного типа сканирования определяется тремя обстоятельствами: неравномерностью фона, характером движения обнаруживаемого ориентира в угловом поле, априорной информацией о цели и фоне. Если фон равномерен, а ориентир неподвижен, то закон сканирования может быть любой: по сигналам, полученным с первых нескольких просматриваемых элементов, строится оценка фона и она экстраполируется на все поле; далее перебираются все элементы по любому закону и проверяются на наличие цели. Оценка фона при этом остается

постоянной. Если же фон неравномерный, то закон сканирования не безразличен. В процессе сканирования приходится все время вычислять новую оценку фона. При этом на точность оценки влияет как способ ее формирования, так и закон сканирования. Поскольку для экономии вычислительных ресурсов желательно использовать оценки фона, вычисляемые на основе результатов анализа всего нескольких элементов, предшествующих анализируемому в каждый момент, то траектории сканирования должны быть непрерывными, без резких скачков. В противном случае ввиду различия фона до скачка траектории и после точность оценки фона в первые моменты времени после скачка будет низкой, а обнаружение — недостоверным. По этому признаку из траекторий поиска, изображенных на рис. 2.5, следует забраковать простое построчное сканирование (рис. 2.5, *а*).

Выбор траектории сканирования в соответствии с характером перемещения ориентира в угловом поле может существенно повысить эффективность поиска. Так, если известно, что ориентир движется строго в одном направлении (как звезда в солнечно-звездной системе ориентации), то достаточно организовать строку поиска перпендикулярно направлению движения; благодаря этому зона поиска существенно уменьшается.

Если направление движения звезды не известно, а время, отведенное на поиск, соизмеримо со временем, в течение которого ориентир может выйти за угловое поле, то преимущество имеют траектории, при которых сканирование начинается на периферии зоны обзора и идет от краев к центру. К таким траекториям относятся спиральные, траектория типа «стягивающийся квадрат» (рис. 2.5, *е, и*). Построчное и розеточное сканирование (рис. 2.5, *б, в, ж*) целесообразно применять, когда цель движется с малой скоростью и за время поиска не может выйти за пределы зоны поиска. (Различные варианты реализации сканирующих систем можно найти также в [14, 23].)

2.2.4. Режим калибровки

Правило относительного измерения реализуется введением в ОЭП жестко связанной с его базой дополнительной отсчетной системы, создающей в фокальной плоскости оптической системы изображение калибрационных меток с помощью канала геометрического эталона. В пространстве предметов этим меткам соответствует опорная система координат (система координат калибрационных меток), жестко связанная с базой прибора. Процедура «привязки» результатов измерений фотоэлектрической части ОЭП к системе координат калибрационных меток называется калибровкой ОЭП.

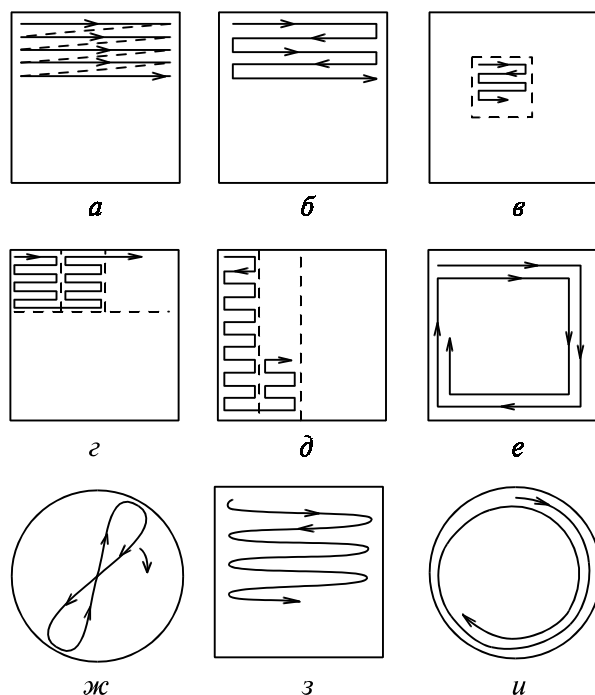


Рис. 2.5. Траектория сканирования при поиске:

a — простое построчное сканирование (без смены направления строк); *б* — построчное сканирование со сменой направления строк; *в* — построчное сканирование со сменой направления строк в малой зоне; *г* — сканирование с наложением малых зон; *д* — построчно-столбцовое сканирование со сменой направления строк; *е* — траектория сканирования «стягивающийся квадрат»; *ж* — «розеточный растр»; *з* — синусоидальное построчное сканирование; *и* — спиральное сканирование

Наиболее детально вопросы калибровки в ОЭП исследованы в применении к ОЭП с электронным сканированием, и прежде всего в приборах с диссектором, так как в этих приборах без калибровки достижение высокой точности невозможно. Разработанные здесь методы во многом могут быть использованы и при калибровке других типов ОЭП (в том числе и углоизмерительных приборов с ПЗС-матрицами).

Рассмотрим применяемые на практике способы калибровки в ОЭП с электронным сканированием [1, 46]. В этих работах содержится описание способов калибровки и вывод соотношений для погрешностей.

1. Калибровка по одной опорной точке. На фотокатод приемника (анализатор прибора) вместе с изображением ориентира проецируется изображение светлой точки, координаты которой относительно базы прибора (x_0 , y_0) точно известны. Если обо-

значить координаты ориентира в базовой системе координат через x , y , а в системе координат фотоприемника (электронного растра) через t , T , то соотношения, определяющие в линейном приближении первые через вторые, записываются в виде

$$\begin{aligned}x &= x_0 + k_x(t - t_0), \\ y &= y_0 + k_y(T - T_0),\end{aligned}$$

где t_0 , T_0 — координаты калибровочной точки в системе координат электронного растра; k_x , k_y — масштабные коэффициенты по осям x , y соответственно, которые считаются заранее известными до измерения.

Данный способ практически устраняет погрешность, связанную со смещением электронного растра относительно базовой системы координат. Результирующая погрешность калибровки определяется нестабильностью масштабных коэффициентов как в пределах углового поля, так и во времени и величиной геометрических искажений. Применение одной опорной точки, расположенной в центре углового поля, позволяет получать высокую точность в центральной зоне. Практически достижимая точность при этом способе калибровки — тысячные доли от размера углового поля.

2. Калибровка по координатной сетке прямых линий без интерполяции. Для измерения координаты x на фотокатод фотоприемника проецируется изображение координатной сетки из $n + 1$ линий, в пространстве предметов являющихся прямыми, перпендикулярными оси x и разбивающими угловое поле на n равных частей. Координаты каждой линии относительно базы известны с высокой точностью. Грубое определение координаты x осуществляется путем подсчета числа изображений линий сетки от границы углового поля до местоположения изображения звезды, точное — измерением разности между координатами звезды и последней подсчитанной линией $t^{(k)}$ в системе координат электронного растра. Связь между координатами звезды в базовой системе координат x и в системе координат электронного растра t выражается зависимостью

$$x = x^{(k)} + k_x(t - t^{(k)}),$$

где $x^{(k)}$, $t^{(k)}$ — координаты последней подсчитанной линии сетки в базовой системе координат и в системе координат электронного растра соответственно; k_x — масштабный коэффициент, который считается заранее известным. Для координат y , T соотношения аналогичны. Погрешность калибровки по данному

способу тем меньше, чем больше число линий в сетке. Так, при 16 линиях может быть достигнута точность в несколько тысячных от углового поля в пределах всего рабочего поля.

3. Калибровка по изображению координатной сетки прямых линий с интерполяцией. Данный способ отличается от предыдущего тем, что для определения координат x , y используется интерполяционный многочлен, который вычисляется по узлам интерполяции $t^{(0)}$, $t^{(1)}$, ..., $t^{(n)}$ и соответствующим им координатам $x^{(0)}$, $x^{(1)}$, ..., $x^{(n)}$. При линейной интерполяции по двум узлам этот многочлен имеет вид

$$L(t) = \frac{x^{(1)} - x^{(0)}}{t^{(1)} - t^{(0)}} t - \frac{x^{(1)}t^{(1)} - x^{(0)}t^{(0)}}{t^{(1)} - t^{(0)}}.$$

Если использовать всего две линии, то погрешность калибровки может составить единицы процентов от углового поля во всем рабочем поле. При 16 линиях погрешность уменьшается до 10-тысячной доли углового поля. Может применяться интерполяция и более высоких порядков (квадратичная и т.д.), однако в этом случае точность калибровки оценить весьма затруднительно, так как неизвестен вид функции, описывающей искажения электронного раstra с точностью до производных третьего, четвертого и т.д. порядков. Реализация этого способа аппаратными средствами достаточно громоздка даже при линейной интерполяции. Поэтому ее выполняют на ЭВМ, входящих в состав приборов.

4. Калибровка по методу наименьших квадратов. Внедрение вычислительной техники в ОЭП позволяет реализовать весьма сложные и точные способы калибровки, к которым относится и данный способ. Суть его состоит в следующем. Перед началом работы в угловом поле прибора высвечиваются точечные калибрационные отметки, координаты которых $x^{(i)}$, $y^{(i)}$ относительно базы известны с высокой точностью и заложены в память ЭВМ. Прибор производит измерение соответствующих значений координат $t^{(i)}$, $T^{(i)}$, которые также передаются в ЭВМ. По совокупности соответствующих пар $x^{(i)}$, $y^{(i)}$ и $t^{(i)}$, $T^{(i)}$ в ЭВМ методом наименьших квадратов решается задача нахождения полиномов заданной степени, аппроксимирующих зависимость между координатами x , y и t , T . Так, для полиномов третьей степени эта задача сводится к решению системы 20 линейных уравнений. Далее считают, что в течение некоторого времени эти полиномы с достаточной точностью описывают связь между координатами x , y и t , T . Когда во время сеанса работы по ориентиру в ЭВМ

поступают результаты измерения его координат $t_{\text{ор}}$, $T_{\text{ор}}$, то с помощью полиномов выполняется их пересчет к истинным координатам $x_{\text{ор}}$, $y_{\text{ор}}$ в базовой системе координат.

Как следует из теории метода наименьших квадратов, при удачном выборе степени аппроксимирующих полиномов и достаточном количестве опорных точек разница между значениями, полученными аппроксимацией полиномами, и истинным значением определяется только погрешностью измерения координат калибрационных отметок. Последняя может быть сделана весьма малой при соответствующем выборе шага дискретности раstra, освещенности калибрационных отметок и времени измерения.

В некоторых случаях возможно проведение в полете частичной калибровки звездных приборов по звездам либо полной калибровки системы «звездный прибор–оптический инструмент на КА» (подробнее об этом см. [66]).

2.3. Последовательность проектирования информационных систем приборов ориентации и навигации КА

Изложенные выше подходы к построению систем обработки информации приборов ориентации и навигации КА дают возможность представить процедуру проектирования такой системы.

Прежде всего, необходимо представить всю последовательность функционирования прибора в части входных информационных воздействий и реакции прибора на эти воздействия. Под входными информационными воздействиями понимают внешние команды, излучение рабочих источников (ориентиров), помеховых источников, включая фон. При этом необходимо предусмотреть также вероятные нештатные ситуации (например, уровень фона выше допустимого или уровень сигнала рабочего ориентира ниже ожидаемого и т.п.). Далее в представленной последовательности необходимо выделить режимы работы прибора, положив в качестве отличительных признаков таких режимов наличие или отсутствие рабочих ориентиров в угловом поле, каких-либо внешних команд, помеховых источников, вспомогательных калибрационных меток и других информационных воздействий, которые должны изменять характер функционирования прибора. Для каждого выделенного режима работы должны быть сформулированы цели, достигаемые этим режимом (описания типовых режимов для приборов ориентации и навигации КА и соответствующих им целей приведены в разд. 2.1).

Для каждого из установленных режимов работы в соответствии с выбранной целью и возможностями практической реализации (с помощью оптико-механических, электронных или программных средств) разрабатывается способ обработки сигнала

лов (подходы к разработке типовых способов обработки сигналов приведены в разд. 2.2). Для выбора количественных значений параметров того или иного способа обработки используются результаты традиционных расчетов — энергетического, точностного и др., а также результаты математического моделирования.

Результатом проектирования информационной системы прибора является перечень режимов работы прибора, способы обработки сигналов в каждом режиме, логика перехода из одного режима в другой. При этом должны быть учтены вероятные нештатные ситуации. По результатам проектирования информационной системы могут быть уточнены конструктивные параметры прибора: размеры входных зрачков, угловых полей, габаритные размеры бленд и т.п.

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕЖИМОВ КАЛИБРОВКИ, ПОИСКА, СЕЛЕКЦИИ И ИЗМЕРЕНИЯ В ОЭП ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ КА

3.1. Принципы построения оптических систем для обеспечения режима калибровки. Оптика адаптивных угломеров

Все ОЭП ориентации и навигации КА, как правило, функционально являются угломерными приборами. В этих приборах режим калибровки и использование принципа относительного измерения обеспечивается расширением функций их оптических систем, что вызывает необходимость в новых принципах и методах построения этих оптических систем.

Исторически первые оптические каналы для осуществления режима калибровки (при решении точностных задач) появились в звездных астроприборах, в которых в качестве приемника излучения использовался диссектор. Этот приемник наряду со многими положительными качествами обладает одним существенным недостатком — нестабильностью геометрического положения и искажением его электронного раstra. Чтобы исключить влияние этого недостатка на точность угловых измерений этих приборов, в них был введен канал оптической калибровки (канал геометрического эталона), посредством которого в центр фотокатода приемника проецируется неподвижное изображение светящейся точки, относительно которой и производится относительное измерение координат изображения звезды. В дальнейшем при повышении точности угловых измерений звездных приборов (до единиц–десятков угловых секунд) возникло понимание влияния нестабильности геометрической схемы угломерного прибора на погрешность его измерений.

Проведенный анализ [27–35] разных методов исключения влияния нарушения геометрии угломеров на их точность показал, что в основе их различия лежит принятое допущение о возможной нестабильности геометрии прибора.

В традиционном представлении геометрическая схема угломерных приборов стабильна на период их эксплуатации. На этом допущении основан известный метод калибровки (метод I), суть которого сводится к следующему. На практике геомет-

рическая схема любого прибора никогда не бывает идеальной (номинальной), а имеет те или иные нарушения (ошибки), т.е. геометрия прибора не номинальная. Например, для теодолита в упрощенной модели его геометрической схемы представлены только три ошибки (параметра нарушения) — коллимационная ошибка, а также наклоны горизонтальной и вертикальной осей его подвеса. При использовании метода I указанные параметры измеряются (определяются), их значения паспортизуются и в качестве поправок учитываются в алгоритме определения угловых координат визируемой цели. Таким образом и исключаются нарушения геометрической схемы из результатов измерений в данном методе.

Однако в настоящее время при проектировании угломеров имеет место и другое допущение: геометрическая схема прибора нестабильна за период эксплуатации, но стабильна на время (момент) проведения измерения. При этом считается, что изменение геометрии — медленно меняющийся процесс и за время проведения измерения геометрическая схема практически стабильная. На основе указанного допущения нашли практическое применение следующие два метода.

Метод компенсации деформации угломера (метод II) основан на непосредственном измерении нарушений геометрии отдельных частей прибора и восстановлении геометрической схемы либо указанных частей, либо угломера в целом. Например, при одностороннем нагреве угломера типа теодолита может недопустимо измениться угол наклона его горизонтальной оси из-за различного изменения длин стоек внешней рамки подвеса (алидады). Чтобы восстановить положение оси до первоначального (паспортного), производится автоматическое измерение разности температур стоек и активный подогрев соответствующей стойки до исчезновения указанной разности температур.

Методические приемы (метод III) позволяют исключить ряд нарушений геометрической схемы угломера, усложнив процедуру проведения измерений и соответствующей математической обработки результатов этих измерений. Типичным примером этого является использование метода круговых приемов в геодезии, что позволяет просто исключить влияние таких ошибок геометрии теодолита, как наклон горизонтальной оси и коллимационная ошибка.

Следует отметить, что при оценке методов II, III вопрос о геометрической стабильности оптических элементов, как правило, специально не обсуждается. Однако, если предположить, что при изменении геометрической схемы прибора в процессе эксплуатации будет, например, нарушено геометрическое подобие его меры (в частности, кодового лимба), то в этом случае

методы II, III становятся неэффективными. Указанная неэффективность привела к логическому уточнению формулировки допущения о стабильности геометрии угломера. Геометрическая схема угломерного прибора нестабильна за период эксплуатации, стабильна на момент проведения измерения, и при этом оптические элементы прибора сохраняют свое геометрическое подобие. (Обоснования и условия сохранения указанного подобия при эксплуатации и хранении имеются в [32–34] и здесь не приводятся.)

Уточненное допущение позволило целенаправленно отобрать ряд известных технических решений, обеспечивающих сохранение точности прибора при нарушении его геометрической схемы. Эти решения вошли в оптику адаптивных угломеров (метод IV), появление которой можно рассматривать как результат анализа и обобщения множества научных работ и изобретений. Использование третьего допущения при стремлении к сохранению точности угломеров привело к разрушению стереотипов традиционных технических решений, что, в свою очередь, позволило относительно быстро создать новые оптические системы адаптивных угломерных приборов [27–31, 34].

При дальнейшем изложении под угломером будем понимать оптико-электронный прибор (астроприбор), в котором широко используются средства вычислительной техники — приборная, бортовая или иная ЭВМ, а также современная элементная база, например такие многоэлементные приемники излучения, как приборы с зарядовой связью (ПЗС), микроболометрические матрицы и т.п. Будем считать также, что в предельном случае высокоточный угломер работает по движущейся цели и выдает результаты измерения в реальном времени. Он установлен на подвижном основании, и на него могут воздействовать самые разнообразные источники нарушения геометрической схемы.

В оптике адаптивных угломеров одним из основных этапов проектирования является математическое описание (моделирование) нарушения их геометрической схемы [34, 35], которое кратко и упрощенно сводится к следующему. Подвижные и неподвижные элементы прибора представляются в виде последовательной цепи составных частей, в которых производится преобразование пространственных характеристик сигнала (к таким преобразованиям можно отнести изменение направления распространения излучения, изменение масштаба изображения, внесение искажений и т.п.). В каждой из таких составных частей вводится своя система координат (СК). Преобразование пространственных характеристик сигнала при переходе из одной СК в другую описывается конструктивными параметрами оптической системы. Может быть введено несколько СК, как минимум три:

- базовая СК, реализуемая конструкцией посадочного места прибора; именно в этой системе координат выдаются показания прибора;
- отсчетная СК — СК, в которой формируется первичный отсчет измерительной схемы прибора; это может быть СК геометрической сетки пикселей матричного приемника, или СК электронного раstra диссектора, или СК механического модулятора;
- опорная СК (или СК калибрационных меток) — специально введенная промежуточная СК опорных калибрационных меток, относительно которых производит измерение измерительная схема прибора; эта опорная СК, реализуемая в виде калибрационных меток, должна быть жестко связана с базовой СК.

Если в процессе эксплуатации угломерного прибора возникает нарушение его геометрической схемы, приводящее к наклону опорной СК относительно базовой СК, то угол этого наклона непосредственно влияет на погрешность измерений данного прибора. Поэтому стабильность взаимного положения этих СК обеспечивается конструктивно. Затем параметры нарушения геометрической схемы и углы поворота осей подвеса представляются взаимным расположением указанных СК и оговариваются последовательности их поворотов. После этого в опорной СК выводится выражение вектора визирной линии угломера, в котором помимо других аргументов присутствуют параметры нарушения его геометрии. Если в результате дальнейших математических преобразований в окончательном выражении удастся избавиться от этих параметров нарушения, то угломер считается адаптивным, т.е. таким, у которого угловое положение визирной линии (в том числе и при совпадении ее с целью) не зависит от параметров нарушения геометрии. А это означает, что угломер обладает свойством самоприспособления (адаптации) и его точность измерения не зависит от деформации его геометрической схемы. Таким образом, возникает основное требование проектирования — обеспечение стабильной геометрии оптических элементов адаптивных угломеров и стабильного углового положения опорной СК относительно базовой СК. Что касается стабильности геометрии остальных частей такого угломера, то требования могут быть существенно снижены по сравнению с традиционными угломерами. Такое снижение требований позволяет существенно уменьшить массу его механической части, снизить ее себестоимость, расширить допуски и т.д. Оптические системы этих угломеров выполнены из относительно простых и, как правило, традиционных оптических элементов.

Адаптивные угломеры можно разделить на три группы: нерасстраиваемые, самокалибрующие и комбинированные. В нерасстраиваемых угломерах эффект адаптации может быть реализован двумя способами. Во-первых, использование нерасстраиваемых и малорасстраиваемых элементов практически позволяет устранить влияние нарушения геометрии оптической системы на угловое положение визирной линии [34]. Во-вторых, введя оптический канал калибровки (канал геометрического эталона), можно настроить оптическую систему так, что указанные нарушения хотя и приводят к малому угловому смещению визирной линии, но не влияют на точность измерений. Например, в оптических системах угломеров [27, 30] в основании подвеса устанавливается широкопольный концентрический моноблок — объектив с угломерной калибрационной сеткой. При этом изображение части его сетки заводится через входной зрачок узкопольного устройства наведения (визирного блока) одновременно с изображением цели. Такая схема обеспечивает непосредственное измерение положения цели относительно калибрационных штрихов сетки моноблока, формирующего опорную СК (принцип относительных измерений). На этом и основана нечувствительность таких угломеров к нарушению их геометрии. К сожалению, для таких нерасстраиваемых угломеров с подвижной линией визирования характерна некоторая техническая сложность моноблоков.

В самокалибрующих угломерах в момент проведения измерений производится определение и учет нарушений их геометрической схемы относительно отдельных оптических элементов, расположение которых в пространстве и определяет фактическую геометрию прибора. Эти элементы работают в параллельном ходе лучей. Поэтому в оптическую систему такого угломера вводится один или несколько фотоэлектрических автоколлиматоров, а указанные оптические элементы снабжены специальными отражателями. Например, в оптических системах угломеров типа теодолита [25, 28, 31] на рамках подвеса размещается пространственный оптический шарнир, выполненный в виде призм с отражателями. Этот шарнир обеспечивает угловое перемещение визирной линии, которая формируется специальным фотоэлектрическим автоколлиматором. Такая схема обеспечивает практически одновременное измерение углового положения изображений цели и автоколлимационных бликов от призм шарнира. На основе этих измерений по специальному алгоритму производится учет нарушений геометрии при непосредственном определении углового положения цели в опорной СК. Такой угломер уже не имеет технологических ограничений. Однако указанный алгоритм достаточно сложен.

В комбинированных угломерах [29] используются технические решения адаптивных угломеров указанных двух групп, что в ряде случаев позволяет исключить определенные технологические, конструктивные и иные ограничения, характерные для угломеров этих групп.

Таким образом, разработанные разнообразные и многочисленные оптические системы адаптивных угломеров [35] выгодно отличаются от приборов, основанных на методах I–III. Действительно, метод I принципиально не может работать при нестабильной геометрии угломера. Восстановление нарушений геометрии угломера методом II может быть осуществлено только частично, а все нарушения устранить практически невозможно. Применение метода III при работе угломера по движущейся цели весьма ограничено из-за неизбежных потерь времени, вызванных усложнением процедуры измерений. Только метод IV, обобщенный в оптике адаптивных угломеров, позволяет создавать угломерные приборы, обеспечивающие проведение угловых измерений в реальном времени при нестабильной геометрической схеме прибора.

3.1.1. Нерасстраиваемые оптические системы с каналами геометрического эталона

Как и любые другие угломерные приборы, ОЭП ориентации и навигации КА подразделяются на две группы: на приборы с неподвижной и подвижной линиями визирования. Нерасстраиваемость приборов первой группы обеспечивается введением в ее оптическую систему нерасстраиваемого канала геометрического эталона (канал калибрационных меток). Вторая группа нерасстраиваемых приборов подразделяется на две подгруппы. В первой перемещение их визирной линии осуществляется посредством нерасстраиваемых сканирующих систем (рассмотрены в гл. 5). В приборах второй подгруппы с подвижной линией визирования типа теодолита применен нерасстраиваемый канал геометрического эталона.

Рассмотрим оптические системы угломерных приборов с неподвижной линией визирования, снабженные нерасстраиваемыми каналами геометрического эталона [36]. Все эти оптические системы в той или иной мере реализованы при создании статических звездных астроприборов. На приведенных ниже рисунках некоторые оптические фокусирующие элементы (объективы, конденсоры и т.д.) показаны как функциональные узлы, конструкция которых не детализируется, эти элементы представлены упрощенно в виде незаштрихованной фигуры из двух дуг.

Оптическая система угломера I. Наиболее известная оптическая система угломера I (рис. 3.1) состоит из объектива 3, в фокальной плоскости которого расположена матрица пикселей 2 прибора с зарядовой связью (ПЗС) 1. Перед объективом расположена зеркально-призменная система (ЗПС) — моноблок призм 4 и 7. Призма 7 представляет собой БкР-180° (угловой световозвращатель), а призма 4 дополняет ЗПС до плоскопараллельной пластины. Перед входной гранью призмы 7 установлен моноблок-коллиматор 9. Изображение точечной диафрагмы 10 фокусируется на матрицу 2. Изображение точечной цели также фокусируется на матрицу 2. Оптические элементы 4, 7, 9, 11 формируют канал геометрического эталона.

Здесь и далее рассмотрим представленные оптические системы упрощенно. На практике сетка 10 моноблока-коллиматора 9 содержит несколько прозрачных калибрационных точек (см. разд. 2.2.4).

Предположим, что конструкция угломера выполнена так, что все оптические элементы системы и их жесткие соединения стабильны, т.е. всегда сохраняют свое геометрическое подобие. Однако в процессе эксплуатации возможны их пространственные линейные и угловые микроперемещения. Поэтому для описания указанного нарушения геометрии угломера свяжем с его оптическими элементами следующие СК: $X_9Y_9Z_9$ — СК коллиматора 9 (опорная СК); $X_7Y_7Z_7$ — СК ЗПС 4, 7; $X_1Y_1Z_1$ — СК приемника излучения (оптико-электронного блока «объектив 3+ПЗС 1»); $X_0Y_0Z_0$ — СК внешней ориентации угломера, СК его посадочного места (базовая СК).

Геометрическое положение (связь) СК с оптическими элементами представлено на рис. 3.1. Следует пояснить, что на этом рисунке вектор $N_0 = \mathbf{i}$ в СК $X_0Y_0Z_0$ описывает угловое положение нормали посадочной плоскости угломера, ось X_1 проходит через заднюю главную точку объектива 3 и центр изображения диафрагмы 10 на матрице 2, а ортогональная структура пикселей на матрице определяет (задает) геометрическую ориентацию осей Y_1Z_1 . В СК $X_7Y_7Z_7$ два вектора $N_7 = \mathbf{P}_7 = \cos 45^\circ \mathbf{i} + \sin 45^\circ \mathbf{j}$ представляют собой соответственно нормаль отражающей грани призмы 7 (светоделителя 5) и ребро крыши призмы 7. В СК $X_9Y_9Z_9$ вектор $\mathbf{A} = -\mathbf{i}$ — это визирная линия коллиматора 9.

При номинальной геометрии угломера все СК взаимно ортогональны. При анализе нарушения его геометрической схемы СК последовательно будут придаваться три линейных микросмещения вдоль каждой оси и три микроповорота вокруг каждой оси СК. Обозначим $\Delta\alpha_n$, $\Delta\beta_n$, $\Delta\gamma_n$ — соответственно микроповороты вокруг осей $X_nY_nZ_n$, где n — номер СК. В данной работе величины, снабженные знаком Δ , являются малыми.

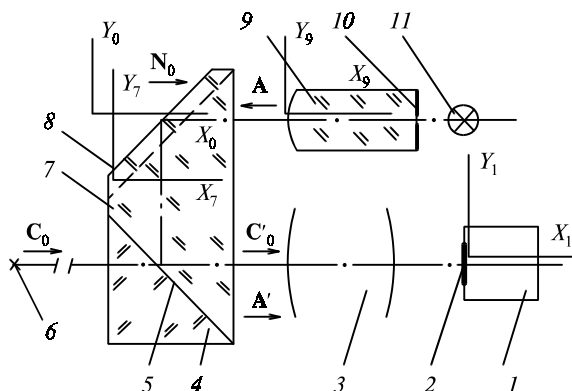


Рис. 3.1. Оптическая система угломера I:

1 — ПЗС; 2 — матрица пикселей; 3 — объектив; 4 — призма; 5 — светоделитель; 6 — точечная цель; 7 — призма БкР-180°; 8 — ребро крыши; 9 — коллиматор; 10 — точечная диафрагма; 11 — осветитель

Принцип действия угломера сводится к следующему. Перед ЗПС 4, 7 и узкопольным объективом 3 в его угловом поле расположена бесконечно удаленная точечная цель (например, звезда) 6, угловое положение которой в СК $X_0Y_0Z_0$ описывается вектором $\mathbf{C} = 1\mathbf{i} + \Delta C_{Y_0}\mathbf{j} + \Delta C_{Z_0}\mathbf{k}$. Назначение угломера — определение угловых координат цели (ΔC_{Y_0} , ΔC_{Z_0}) в СК $X_0Y_0Z_0$. Однако физически определение координат цели происходит в СК $X_1Y_1Z_1$, т.е. определяются величины (ΔC_{Y_1} , ΔC_{Z_1}) относительно начала точки отсчета на матрице 2, формируемой точечным изображением диафрагмы 10 (пучком лучей, описываемым вектором $\mathbf{A}'$). При номинальной геометрии $\Delta C_{Y_0} = \Delta C_{Y_1}$, $\Delta C_{Z_0} = \Delta C_{Z_1}$. Однако при нарушенной геометрической схеме и эти равенства могут быть нарушены, что приведет к ошибкам в определении угловых координат цели. Для простоты проведения анализа будем считать, что

$$\mathbf{C} = \mathbf{N}_0 = \mathbf{C}_0 = 1\mathbf{i}, \quad (3.1)$$

т.е. $\Delta C_{Y_0} = \Delta C_{Z_0} = 0$.

Сначала проведем оценку микроперемещений ЗПС 4, 7 на положение векторов $\mathbf{C}'_0$ и $\mathbf{A}'$, прошедших ее. Известно, что в параллельном ходе лучей линейные смещения ЗПС (в том числе 4, 7) на их угловое положение не влияют. Угловые повороты СК $X_7Y_7Z_7$ (ЗПС 4, 7) на угловое положение векторов $\mathbf{C}'_0$ и $\mathbf{A}'$ также не влияют. Призма 7 (БкР-180°) как световозвращатель поворачивает падающий пучок лучей $\mathbf{A}$ на 180°, т.е. $\mathbf{A} = -\mathbf{A}'$. По отношению к пучку лучей $\mathbf{C}_0$ ЗПС 4, 7 как плоскопараллельная пластина также не меняет его углового положения, т.е. $\mathbf{C}_0 = \mathbf{C}'_0$. Таким образом,

на вход оптико-электронного блока 3–1 поступают два пучка лучей, которые в СК $X_0Y_0Z_0$ определяются выражением

$$\mathbf{A}' = \mathbf{C}'_0 = 1\mathbf{i}. \quad (3.2)$$

Поэтому любые возможные микроперемещения ЗПС 4, 7 на точность угломера не влияют.

Теперь оценим влияние микроперемещений элементов блока 3–1. Так как после ЗПС 4, 7 ход лучей от цели 6 ($\mathbf{C}'_0$) и коллиматора 9 ($\mathbf{A}'$) является совместным, то в силу этого любые микроперемещения линз объектива 3, матрицы 2 и ПЗС 1 приводят к одновременному и одинаковому смещению изображений цели 6 и диафрагмы 10 по матрице 2. Напомним, что фактическое измерение координат цели осуществляется в СК $X_1Y_1Z_1$ относительно точечного изображения диафрагмы 10. Поэтому микроперемещения элементов 3–1, приводящие к совместному перемещению изображений 6, 10, на точность измерения не влияют.

В силу вышеизложенного при дальнейшем анализе нас будет интересовать только угловое положение векторов $\mathbf{C}'_0$ и $\mathbf{A}'$ в СК $X_0Y_0Z_0$, расположенных непосредственно перед блоком 3–1. Если

$$\mathbf{C}'_0 = \mathbf{A}', \quad (3.3)$$

то оптическая система нерасстраиваемая и микроперемещения ее оптических элементов не влияют на точность измерения угломера. Если же $\mathbf{C}'_0 \neq \mathbf{A}'$, то такая система является расстраиваемой относительно базовой СК $X_0Y_0Z_0$.

Анализ влияния микроперемещений моноблока-коллиматора 9 приводит к тому, что вектор $\mathbf{A}'$ в СК $X_0Y_0Z_0$ будет

$$\mathbf{A}' = 1\mathbf{i} + \Delta\gamma_9\mathbf{j} + \Delta\beta_9\mathbf{k}. \quad (3.4)$$

Таким образом, микроповороты $\Delta\gamma_9$, $\Delta\beta_9$ моноблока 9 ($\mathbf{A}'$) вокруг осей Z_9 , Y_9 приводят к нарушению равенства (3.3). Отсюда вытекает условие нерасстраиваемости рассмотренной схемы

$$\Delta\gamma_9 = \Delta\beta_9 = 0, \quad (3.5)$$

которое формирует требование к конструкции такого угломера: его конструкция должна обеспечивать во времени стабильность углового положения визирной линии ($\mathbf{A}$) коллиматора 9 относительно нормали ($\mathbf{N}_0$) посадочной плоскости Y_0 , Z_0 (опорной СК $X_9Y_9Z_9$ относительно базовой $X_0Y_0Z_0$).

Оптическая система угломера II. Эта оптическая система (рис. 3.2) отличается от системы I только тем, что оптическая ось объектива 3 повернута на 90° . Оптические элементы 4, 7, 9, 11 форми-

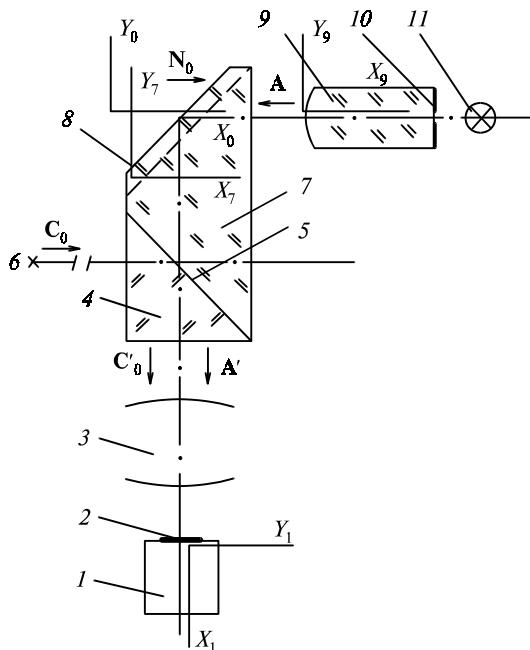


Рис. 3.2. Оптическая система угломера II:

1 — ПЗС; 2 — матрица пикселей; 3 — объектив; 4 — призма AP-90°; 5 — светоделитель; 6 — точечная цель; 7 — призма БКР-180°; 8 — ребро крыши; 9 — коллиматор; 10 — точечная диафрагма; 11 — осветитель

руют канал геометрического эталона. Анализ нарушения геометрии этой схемы приводит в СК $X_0Y_0Z_0$ к следующим выражениям векторов A' , C'_0 перед блоком 3—I:

$$A' = (2\Delta\gamma_7 - \Delta\gamma_9)\mathbf{i} - \mathbf{l}\mathbf{j} + (\Delta\beta_7 - \Delta\alpha_7 + \Delta\beta_9)\mathbf{k}, \quad (3.6)$$

$$C'_0 = 2\Delta\gamma_7\mathbf{i} - \mathbf{l}\mathbf{j} + (\Delta\beta_7 - \Delta\alpha_7). \quad (3.7)$$

Из сопоставления этих двух выражений следует, что условие нерасстраиваемости (3.3) рассматриваемой схемы будет обеспечено при выполнении равенства (3.5), т.е. все выводы и особенности конструкции, относящиеся к системе I, распространяются без изменений и на систему II.

Для оптических систем угломеров I, II характерен также один следующий недостаток: если все же визирная линия коллиматора 9 (A) отклонилась относительно нормали посадочной плоскости N_0 на некоторый угол $\Delta\epsilon$, то непосредственно его измерить невозможно. Для выявления этого угла необходимо установить угломер на специальный стенд и провести на нем измерения точности угломера по полной программе. По-видимому, указанный недостаток стал одной из причин разработки оптической системы угломера III.

Оптическая система угломера III. Эта оптическая система (рис. 3.3) отличается от системы I только конструкцией коллиматора, установленного перед входной гранью призмы 7. Сам коллиматор выполнен из моноблока оптических элементов 9, 11, 13 и плоского зеркала 15. У оптического элемента 9 сферическая преломляющая поверхность 10 выполняет функцию объектива коллиматора. На прямоугольной призме 11 нанесена точечная диафрагма 13 так, что ее мнимое изображение, построенное светоделителем 14, совпадает с передней главной точкой плосковыпуклой линзы 9, 11, расстояние от которой (приведенное к воздуху) до плоского зеркала 15 составляет половину фокусного расстояния коллиматора. Оптические элементы 4, 7, 9, 11, 12, 15 составляют канал геометрического эталона. Такая конструкция оптической системы обеспечивает фокусирование изображения диафрагмы 13 на матрице 2 и соответствующее формирование СК $X_1Y_1Z_1$. С моноблоком 9, 11 связана СК $X_9Y_9Z_9$. Ее начало совмещено с вершиной поверхности 9, а плоскость X_9Y_9 проходит через центр диафрагмы 13. СК $X_{15}Y_{15}Z_{15}$ является СК плоского зеркала 15 (опорная СК), причем его нормаль в этой СК имеет вид $N_{15} = i$.

При номинальной геометрии СК $X_9Y_9Z_9$ и СК $X_{15}Y_{15}Z_{15}$ ортогональны СК $X_0Y_0Z_0$. В результате проведенного анализа нарушений геометрической схемы угломера III в СК $X_0Y_0Z_0$ получены выражения векторов перед блоком 3–1:

$$A' = li + \Delta\gamma_{15}j - \Delta\beta_{15}k, \quad (3.8)$$

$$C'_0 = li. \quad (3.9)$$

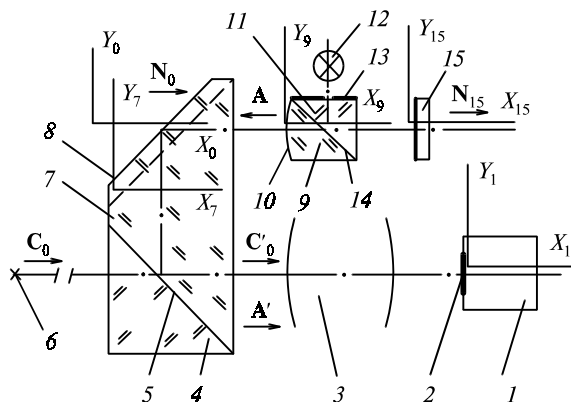


Рис. 3.3. Оптическая система угломера III:

1 — ПЗС; 2 — матрица пикселей; 3 — объектив; 4 — призма; 5 — светоделитель; 6 — точечная цель; 7 — призма БКР-180°; 8 — ребро крышки; 9 — оптический элемент; 10 — сферическая преломляющая поверхность; 11 — прямоугольная призма; 12 — осветитель; 13 — точечная диафрагма; 14 — светоделитель; 15 — плоское зеркало

Из (3.8) следует, что в этой системе микроперемещения моноблока 9, 11 также не влияют на угловое перемещение вектора A' , как и микроперемещения ЗПС 4, 7.

Чтобы в этой системе было выполнено условие нерастраиваемости (3.3), необходимо обеспечить равенство

$$\Delta\gamma_{15} = \Delta\beta_{15} = 0. \quad (3.10)$$

Таким образом, имеет место полная аналогия с системами I, II, т.е. для обеспечения нерастраиваемости необходимо конструктивно обеспечить неизменность пространственного положения векторов N_0 и N_{15} (опорной СК $X_{15}Y_{15}Z_{15}$ относительно базовой СК $X_0Y_0Z_0$).

Как видно из рис. 3.3, в системе III заложена потенциальная возможность непосредственного измерения угла $\Delta\epsilon$ (угла между векторами N_0 и N_{15}), например, автоколлимационным методом. Однако для его осуществления необходимо иметь доступ к зеркалу 15 с внешней стороны кожуха угломера. А это крайне неудобно, так как необходимо ввести дополнительное защитное стекло перед зеркалом 15 и/или закрываемое отверстие в кожухе.

Если зеркало 15 вынести из угломера III и закрепить его на блоке, формирующем СК космического аппарата, то в этом случае образуется оптическая связь, посредством которой угломер III производит измерение угловых координат визируемой звезды непосредственно в СК космического аппарата.

Оптическая система угломера IV (рис. 3.4). Единственным оптическим элементом, обращенным непосредственно наружу ОЭП, является, как известно, его защитное стекло, расположенное непосредственно перед объективом. Поэтому в угломере IV реализовано начало отсчета на матрице 2, связанное с нормалью N_7 плоскопараллельной пластины (защитного стекла 7). Оптическая система этого угломера занимает особое место. Она содержит оптико-электронный блок 3–1, перед объективом 3 которого размещена наклонная (под углом 45°) плоскопараллельная пластина 9 и защитное стекло 7 с зеркалом 8. Перпендикулярно оптической оси объектива 3 перед наклонной пластиной 9 установлены навстречу друг другу моноблок-коллиматор 11, в фокальной плоскости которого размещена точечная диафрагма 12, и моноблок-световозвращатель (зеркально-линзовый отражатель) 4, с фокальной плоскостью которого совмещено плоское зеркало 5. Оптические элементы 4, 7, 9, 11, 13 составляют канал геометрического эталона.

При включении осветителя 13 из коллиматора 11 выходит параллельный пучок лучей, который описывается вектором A . Этот пучок на светоделителе 10 раздваивается на два пучка. Первый, отраженный от светоделителя, отражается от зеркала 8

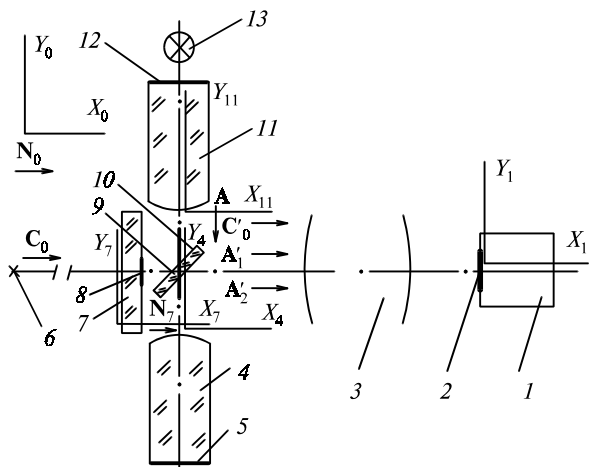


Рис. 3.4. Оптическая система угломера IV:

1 — ПЗС; 2 — матрица пикселей; 3 — объектив; 4 — зеркально-линзовый отражатель; 5 — плоское зеркало; 6 — точечная цель; 7 — защитное стекло; 8 — плоское зеркало; 9 — плоскопараллельная пластина; 10 — светоделитель; 11 — коллиматор; 12 — точечная диафрагма; 13 — осветитель

и, пройдя светоделитель 10, входит в объектив 3. Он описывается вектором A'_1 . Второй пучок, прошедший светоделитель, последовательно отразившись на световозвращателе 4 и светоделителе 10, входит в объектив 3. Он представлен вектором A'_2 . Оба параллельных пучка лучей A'_1 , A'_2 и пучок лучей от цели $C_0 = C'_0$ фокусируются объективом 3 на матрице 2 в виде трех точечных изображений.

Для представления нарушения геометрии угломера свяжем с его оптическими элементами следующие СК: $X_{11}Y_{11}Z_{11}$ — СК коллиматора 11; $X_9Y_9Z_9$ — СК светоделителя 10; $X_7Y_7Z_7$ — СК защитного стекла 7; $X_4Y_4Z_4$ — СК световозвращателя 4; $X_1Y_1Z_1$ — СК оптико-электронного блока «объектив 3 + ПЗС 1»; $X_0Y_0Z_0$ — СК внешней ориентации угломера, СК его посадочного места (базовая СК). Геометрическое положение (связь) СК с оптическими элементами представлено на рис. 3.4.

Следует отметить, что ось X_1 СК $X_1Y_1Z_1$ проходит через заднюю главную точку объектива 3 и точку на матрице 2, являющейся серединой отрезка, образованного двумя точечными изображениями двух пучков лучей A'_1 и A'_2 . Указанная точка является началом отсчета на матрице 2, как и в предыдущих оптических системах. Ортогональная структура пикселей этой матрицы определяет (задает) геометрическую ориентацию осей X_1Z_1 . Положение остальных векторов, связанных с оптическими элементами в соответствующих СК представлено в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Положение векторов, связанных с оптическими элементами в СК

СК	Плоскость или оптический элемент	Выражение нормали (N) или пучка лучей (A)
$X_0 Y_0 Z_0$	Посадочная плоскость	$N_0 = 1i$
$X_4 Y_4 Z_4$	Зеркало 5	$N_4 = 1j$
$X_7 Y_7 Z_7$	Зеркало 8	$N_7 = 1i$
$X_9 Y_9 Z_9$	Светоделитель 10	$N_9 = -\sin 45^\circ i + \cos 45^\circ j$
$X_{11} Y_{11} Z_{11}$	Коллиматор 11	$A = -1j$

При номинальной геометрической схеме все СК ортогональны, а три точечных изображения (C'_0 , A'_1 , A'_2) геометрически совмещены.

Анализ нарушения геометрической схемы угломера приводит к следующим выражениям векторов перед объективом 3 в СК $X_0 Y_0 Z_0$:

$$C'_0 = 1i, \quad (3.11)$$

$$A'_1 = 1i + (\Delta\gamma_{10} - 2\Delta\gamma_9 + 2\Delta\gamma_7)j + (-\Delta\alpha_{10} - \Delta\alpha_9 - \Delta\beta_9 - 2\Delta\beta_7)k, \quad (3.12)$$

$$A'_2 = 1i + (-\Delta\gamma_{10} + 2\Delta\gamma_9)j + (\Delta\alpha_{10} + \Delta\alpha_9 + \Delta\beta_9)k. \quad (3.13)$$

При условии

$$\Delta\gamma_7 = \Delta\beta_7 = 0 \quad (3.14)$$

оба вектора A'_1 , A'_2 симметричны относительно оси, которая совпадает с векторами $N_0 = N_7$ в СК $X_0 Y_0 Z_0$:

$$A_{cp} = [0,5 (A'_1 + A'_2)] = N'_7 = 1i. \quad (3.15)$$

При условии

$$\Delta\gamma_{10} = \Delta\alpha_{10} = \Delta\gamma_9 = \Delta\alpha_9 = \Delta\beta_9 = 0, \quad (3.16)$$

когда имеют место только микроповороты защитного стекла 7 на углы $\Delta\gamma_7$ и $\Delta\beta_7$ соответственно вокруг осей Z_7, Y_7 , вектор A_{cp} также совпадает с вектором N_7 в СК $X_0 Y_0 Z_0$:

$$A_{cp} = N_7 = 1i + \Delta\gamma_7 j - \Delta\beta_7 k. \quad (3.1.17)$$

Таким образом, вектор $A_{cp} = 0,5 (A'_1 + A'_2)$ при всех условиях параллелен вектору N_7 . Отсюда становится понятной вышеописанная процедура формирования СК $X_1 Y_1 Z_1$ и начало отсчета на матрице 2 в виде точки, лежащей на середине отрезка, образованного двумя точечными изображениями A'_1 и A'_2 .

Практически нарушения геометрии угломера весьма малые, соизмеримые с погрешностями измерения прибора. Поэтому

изображения пучков A'_1 и A'_2 на матрице будут представлять собой одно изображение, состоящее из двух наложенных друг на друга абберрационных пятен рассеяния, которые во времени могут смещаться относительно друг друга. В этом случае определение начала отсчета сводится к стандартной процедуре определения энергетического центра этого составного изображения, которая ничем не отличается от процедуры, используемой в угломерах I, II, III.

Из вышеизложенного следует, что угломер IV становится нерасстраиваемым относительно СК $X_0Y_0Z_0$, т.е. выполняется условие (3.3) при равенстве (3.14). Практически это означает, что конструктивными мерами необходимо обеспечить неизменное угловое положение защитного стекла 7, являющегося физическим носителем опорной СК, относительно посадочной плоскости Y_0Z_0 базовой СК. Однако, если в качестве посадочной плоскости можно использовать входную грань защитного стекла 7 в угломере IV, то в этом случае равенство (3.14) выполняется автоматически и данный угломер можно рассматривать как абсолютно нерасстраиваемый. Как показано выше, положение вектора A_{cp} не зависит от микроперемещений коллиматора II и световозвращателя 4. Поэтому эти узлы целесообразно выполнять не в виде моноблоков (как на рис. 3.4), а по традиционной конструкции. Например, коллиматор II будет представлять собой объектив и сетку, установленные в общий металлический корпус. При этом смещение сетки относительно объектива будет приводить к повороту вектора A , но не будет влиять на положение вектора A_{cp} .

Компоновка оптической системы угломера IV позволяет достаточно просто измерить угол $\Delta\epsilon$ между посадочной плоскостью Y_0Z_0 и защитным стеклом 7. Это можно, например, делать при установке прибора на стенде для проверки точности, закрепив на нем автоколлиматор, визирная линия которого перпендикулярна посадочной плоскости стенда, с которой совмещается посадочная плоскость угломера IV.

Как видно из проведенного анализа, все оптические системы рассмотренных угломеров нерасстраиваемы относительно их специально выбранных оптических элементов. Однако при изменении взаимного углового положения между указанным оптическим элементом и посадочной плоскостью прибора его нерасстраиваемость нарушается. Эта проблема может быть решена только в угломере IV.

Теперь рассмотрим конструкции основных типов коллиматоров-моноблоков, которые нашли применение в каналах геометрических эталонов звездных приборов с неподвижной линией визирования.

Линзовый коллиматор (рис. 3.5) состоит из осветителя 1, сетки 2, кольца 3, корпуса 4 и линзового объектива 5. Осветитель 1 может быть выполнен в виде светодиода, излучающего свет с длиной волны λ . Рисунок сетки 2 совмещен с фокальной плоскостью объектива 5. Фокусировка сетки 2 относительно объектива 5 осуществляется посредством кольца 3. Корпус 4 цилиндрический. Все детали должны быть выполнены из одного изотропного оптического материала (плавленого кварца или оптического стекла) и склеены оптическим клеем. Объектив может быть двухлинзовый для исправления термоаббераций для длины волны излучения λ (для исключения термодефокусировки фокальной плоскости объектива относительно плоскости рисунка сетки). В этом случае материалы линз имеют разные термоконстанты и должны иметь максимально близкие значения их коэффициентов линейного расширения.

Зеркальный коллиматор (рис. 3.6) состоит из осветителя 1, сетки 2, кольца 3, корпуса 4, сферического зеркала 5 и плоскопараллельной пластины со светоделительным покрытием 6. Так как оптическая система коллиматора зеркальная, то в качестве осветителя можно использовать и немонохроматический источник излучения. Плоскость рисунка сетки 2 совмещена с фокальной плоскостью сферического зеркала (объектива) 5. Фокусировка сетки 2 относительно объектива 5 осуществляется посредством кольца 3. На корпусе 4 крепятся все оптические элементы, в том числе и светоделитель 6, у которого коэффициент отражения ρ равен коэффициенту его пропускания τ ($\rho/\tau = 1$). Все детали коллиматора выполнены из одного изотропного оптического материала и жестко соединены (либо склеены, либо установлены посредством глубокого оптического контакта).

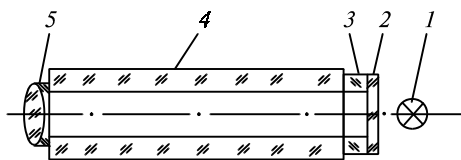


Рис. 3.5. Линзовый коллиматор-моноблок:
1 — осветитель; 2 — сетка; 3 — кольцо;
4 — корпус; 5 — линзовый объектив

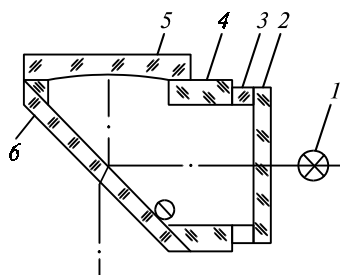


Рис. 3.6. Зеркальный моноблок-коллиматор:
1 — осветитель; 2 — сетка; 3 — кольцо; 4 — корпус; 5 — сферическое зеркало (объектив);
6 — светоделитель

Так как у всех оптических деталей коллиматора коэффициенты линейного термического расширения одинаковы, то при изменении температуры окружающей среды и при отсутствии градиента температуры зеркальный коллиматор изменяет свои линейные размеры, но полностью сохраняет свое геометрическое подобие. Сохранение геометрического подобия зеркального коллиматора при изменении температуры полностью исключает его термоабберации (термодефокусировку фокальной плоскости относительно плоскости сетки).

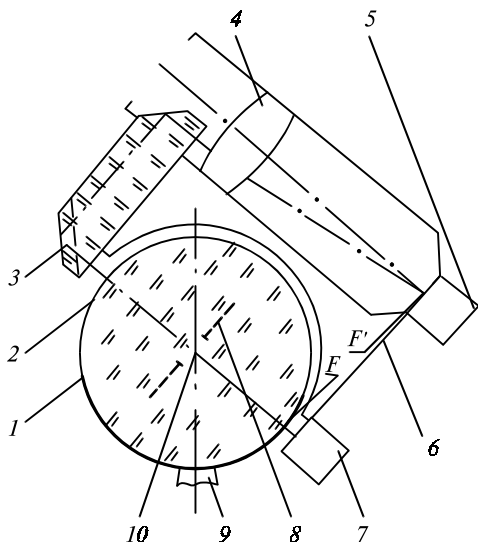
Более полно проблема стабильности оптических характеристик оптических элементов угломерных приборов рассмотрена в [33, 35], в которых показано, что для преломляющих оптических элементов наилучшим оптическим материалом является плавленый кварц, а для отражающих — бериллий и германиевая кордиеритовая керамика. Благодаря тому, что свет от излучателя сначала отражается от светоделителя 6, а потом проходит через него (рис. 3.6), зеркальный коллиматор имеет относительно низкий коэффициент пропускания. Светоделитель 6 формирует также слабый расфокусированный блик. Однако благодаря своей термонерасстраиваемости зеркальный коллиматор нашел широкое применение в каналах геометрического эталона звездных астроприборов.

Рассмотрим нерасстраиваемые оптические системы угломеров с подвижной линией визирования. Из всей совокупности нерасстраиваемых оптических систем с подвижной линией визирования [35] рассмотрим наиболее характерную, которая представляет собой оптическую систему адаптивного угломера в двухступенном подвесе.

Прежде чем перейти к рассмотрению этой системы, обратимся к рис. 3.1. В этом угломере при неподвижном коллиматоре-моноблоке все остальные оптические элементы могут быть подвижными и при этом в силу нерасстраиваемости угломера его точность измерений не ухудшается. На этом и было основано эвристическое решение [27, 35] перехода от оптической системы с неподвижной линией визирования (рис. 3.1) к системе с подвижной линией визирования (рис. 3.7), которая состоит из концентрического широкопольного коллиматора 2, установленного на основании двухступенного подвеса, и размещенных на внутренней рамке подвеса 6 элементов схемы: осветителя 7, уголкового отражателя 3, объектива 4 и ПЗС 5. Концентрический коллиматор-моноблок представляет собой линзу-шар, изготовленную из стекла с показателем преломления $n = 2$ (стекло типа СТФ ОСТ-2-69-77). У такой линзы преломляющая и фокальная поверхности геометрически совпадают. На нижней полусфере шара нанесена калибрационная угломерная сетка 1, на ее сферической поверхности — прозрачные штрихи в виде меридианов и широт (на рис. 3.7

Рис. 3.7. Оптическая система адаптивного угломера в двух-степенном подвесе:

1 — угломерная сетка с прозрачными штрихами; 2 — концентрический широкопольный коллиматор (линза-шар из стекла с показателем преломления $n = 2$); 3 — призма БкР-180° (уголковый отражатель); 4 — объектив; 5 — ПЗС; 6 — внутренняя рамка подвеса; 7 — осветитель; 8 — промежуточный зрачок, сформированный осветителем; 9 — основание подвеса; 10 — центр кривизны линзы-шара, точка пересечения вертикальной и горизонтальной осей рамок подвеса (внешняя рамка подвеса на рисунке не показана)



полярная ось сетки вертикальна). С этими штрихами связана неподвижная опорная система координат СК $X_0Y_0Z_0$, начало которой расположено в центре шара (рис. 3.8). Горизонтальная плоскость проходит через штрих экватора, а плоскость X_0Y_0 совмещена с начальным (нулевым) штрихом меридианом, который, как и штрих экватора, отличается от других штрихов некоторым параметром, например толщиной. Горизонтальный угол $A_m = A_m$, где m — порядковый номер штриха меридиана; A — центральный угол на экваторе между соседними меридианами. Вертикальный угол H_p каждого штриха широты есть $H_p = H_p$, где p — порядковый номер штриха широты; H — центральный угол на меридиане между соседними штрихами широты. Фактические значения A_m , H_p могут быть паспортизованы и храниться в памяти приборного микропроцессора.

Вертикальная (полярная) ось Y_0 совпадает с номинальным положением оси вращения внешней рамки подвеса угломерного прибора, на которой установлена внутренняя рамка 6. Номинальное положение оси вращения рамки 6 перпендикулярно оси Y_0 . Оси вращения рамок геометрически пересекаются в точке 10.

Осветитель 7 не только производит подсветку сетки 1, но и формирует входной (выходной) зрачок 8 коллиматора. Этот зрачок при перемещении рамки 6 также соответственно перемещается

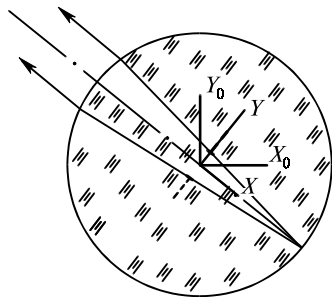


Рис. 3.8. Линза-шар.

внутри линзы-шара. Угловой отражатель (призма БкР-180°) 3 обеспечивает передачу изображения сетки 1 из коллиматора в объектив 4, в фокальной плоскости которого размещена матрица пикселей ПЗС 5. Таким образом, на ПЗС формируется резкое изображение сетки 1 и бесконечно удаленной точечной цели (например, звезды). Следует отметить, что оптические элементы 7, 2, 3 формируют в этом угломере канал геометрического эталона. На рамке 6 перед призмой 3 и объективом 4 установлен затвор. При его закрытии на ПЗС изображение цели исчезает, а изображение сетки остается. ПЗС подключен к электронному блоку, снабженному приборным процессором, который обеспечивает выполнение ряда функций: определение энергетических центров изображений на ПЗС, проведение счета числа изображений штрихов, определение положения изображения цели относительно изображений штрихов и т.д. С рамкой 6 связана подвижная СК XYZ, при номинальной геометрии ось X которой является оптической осью системы, ось Z параллельна оси вращения рамки 4, плоскость YZ совмещена с ПЗС 5 (рис. 3.7 и 3.8).

Сущность способа определения сферических координат цели — ее горизонтальных и вертикальных углов в СК $X_0Y_0Z_0$ — состоит в следующем. Пусть имеется априорная информация о том, что цель (звезда) расположена в телесном угле, образованном ячейкой сетки 1, сформированной штрихами меридиан с номерами m^* , $m^* + 1$ и штрихами широт p^* , $p^* + 1$. Вопрос о том, каким образом получена указанная априорная информация, в данном случае рассматривать не будем. Угломер находится в исходном положении (оси X_0 , X совмещены), затвор перед компенсатором закрыт (подсветка штрихов включена). По командам с ЭВМ включается привод прибора, происходит поворот внешней рамки подвеса и электронный блок осуществляет подсчет m^* изображений меридиан, прошедших по ПЗС. Затем происходит поворот внутренней рамки 6 и электронный блок подсчитывает p^* изображений широт, прошедших по ПЗС 5. Привод останавливается, затвор открывается. В результате на ПЗС располагается изображение указанной ячейки сетки, внутри которой имеется изображение цели. Электронный блок осуществляет обнаружение изображения цели и определение положения ее энергетического центра.

Электронный блок и приборный процессор осуществляют процедуру определения относительного положения k_n энергетического центра изображения цели между изображениями штрихов широт с номерами p^* , $p^* + 1$ ($0 \leq k_n \leq 1$) и относительного положения k_A энергетического центра изображения цели между изображениями штрихов меридиана с номерами m^* , $m^* + 1$ ($0 \leq k_A \leq 1$).

Определение величин k_H , k_A производится на основе метода измерения с оптической дискриминацией изображения (см. также разд. 2.2.4). Сферические координаты цели определяются выражениями

$$\left. \begin{aligned} H &= H_p^* + (H_{p+1}^* - H_p^*)k_H, \\ H &= H_{p-1}^* - (H_{p+1}^* - H_p^*)(1 - k_H), \\ A &= A_m^* + (A_{m+1}^* - A_m^*)k_A, \\ A &= A_{m+1}^* - (A_{m+1}^* - A_m^*)(1 - k_A). \end{aligned} \right\} \quad (3.18)$$

Таким образом, измерения координат цели в основной СК $X_0 Y_0 Z_0$, проводимые данным прибором, сведены к измерениям расположения изображения цели относительно штрихов калибрационной угломерной сетки неподвижного коллиматора-моноблока.

Рассматриваемая оптическая система является практически нерасстраиваемой. Это означает, что микроперемещения отдельных оптических элементов системы, появление которых возможно в процессе эксплуатации, приведут к столь малому смещению энергетического центра изображения цели относительно штрихов сетки объектива, что практически не повлияют на точность измерений. В отношении возможных микроперемещений призмы 3, объектива 4 и ПЗС 5 это положение можно считать доказанным в силу прямой аналогии между оптической системой с неподвижной линией визирования (рис. 3.1) и рассматриваемой системой (рис. 3.7). Поэтому остановимся на различиях этих двух оптических систем.

Во-первых, нецентрированный ввод визирной линии канала геометрического эталона (рис. 3.7) в объектив 4 приводит к тому, что дефокусировка фокальной плоскости объектива 4 относительно ПЗС 5 (например, из-за термдефокусировки) приведет к взаимному смещению изображений штрихов сетки и точечной цели. Поэтому при таком нецентрированном вводе требуется исправление термоаббераций (исключение термдефокусировки) оптической системы.

Во-вторых, оси подвеса или точка их пересечения по чисто технологическим причинам могут существенно отстоять от центра кривизны 10 линзы-шара, что в свою очередь приведет к децентрировке зрачка 8 относительно точки 10. Математическое моделирование этого случая проведено на конкретном примере в [35]. Показано, что при децентрировке зрачка 8 относительно точки 10, равной 1% от фокусного расстояния линзы-шара, сме-

шение энергетического центра изображения точечной цели относительно штрихов сетки 1 составляет менее 1 угл. с, что можно считать вполне приемлемым для большинства звездных астроприборов с подвижной линией визирования.

Рассмотренная линза-шар относится к типу элементарных концентрических оптических систем (ЭКОС) [35]. Эта система не является лучшей по материалу. Как это было отмечено выше, лучшим оптическим материалом для создания оптических моноблоков является плавленый кварц. Конструкция ЭКОС (линзового коллиматора) из плавленого кварца представлена на рис. 3.9. Если существует ЭКОС — линзовый коллиматор, то должен существовать и его зеркальный аналог. ЭКОС — широкопольный зеркальный коллиматор (рис. 3.10) является логическим развитием зеркального коллиматора, показанного на рис. 3.6.

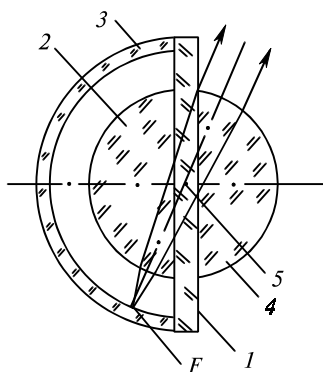


Рис. 3.9. ЭКОС — линзовый коллиматор:

1 — пластина; 2, 4 — линзы; 3 — сферическая сетка; 5 — общий центр кривизны

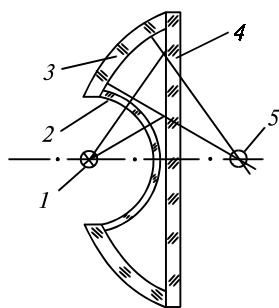


Рис. 3.10. ЭКОС — зеркальный коллиматор:

1 — осветитель; 2 — сферическая сетка; 3 — сферическое зеркало; 4 — светоделитель, выполненный в виде плоскопараллельной пластины; 5 — центр кривизны зеркала 3, совмещенный с изображением центра кривизны сферической сетки

Принципиальным отличием ЭКОС — зеркального коллиматора от линзового заключается в том, что осветитель имеет небольшие размеры и может закрепляться неподвижно на основании двухступенного подвеса угломера типа, показанного на рис. 3.7. В обычных широкопольных коллиматорах с неподвижным осветителем световой поток F от каждой прозрачной точки (сетки) его углового поля ω изменяется по закону

$$F = K \cos^4 \omega,$$

где K — постоянная величина. Если в ЭКОС на рис. 3.10 его осветитель выполнен в виде равнояркого шара 1, центр кривизны

которого совмещен с центром кривизны сетки 2, то в этом случае исключается изменение светового потока F по угловому полю широкопольного коллиматора ($F = \text{const}$). В этом смысле рассмотренный зеркальный коллиматор является уникальной оптической системой.

Следует также обратить внимание еще на одну проблему. Если попытаться на основе оптических систем (рис. 3.7) построить адаптивный угломерный прибор типа теодолита, у которого высотный H и азимутальный A углы не имеют ограничений ($H \leq 180^\circ$, $A \leq 360^\circ$), то окажется, что в таких теодолитах будет чисто конструктивное ограничение по высотному углу. При этом следует отметить, что высокоточное нанесение большого количества штрихов, точек и т.д. на сферической поверхности — сложная технологическая задача. Этим и объясняется появление самокалибрующихся и комбинированных адаптивных систем, которые и будут рассмотрены в следующем разделе.

3.1.2. Самокалибрующиеся и комбинированные оптические системы

Самокалибрующиеся и комбинированные оптические системы адаптивных угломеров — это ОЭП с подвижной линией визирования. Так как сами эти системы, математическое описание нарушения их геометрической схемы и процедура их калибровки достаточно сложны, то ограничимся рассмотрением отдельных примеров самокалибрующихся и комбинированных оптических систем (подробно эти и другие системы описаны в работах [27–32, 35, 42]). Следует отметить, что методы калибровки, разработанные при создании самокалибрующихся и комбинированных систем, достаточно просто могут быть перенесены в любой высокоточный угломерный ОЭП с подвижной линией визирования для придания ему свойства адаптации к нарушению его геометрической схемы.

Первый адаптивный самокалибрующийся угломер (рис. 3.11). Датчики угла поворота оптического шарнира (ОШ) выполнены в виде фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) 3, 4, которые содержат соответственно кодовые лимбы 5, 9. В ОШ установлены две пентапризмы 7 и 11. Призма 7 установлена на подвижной детали 21 (внутренняя рамка подвеса), опорой которой является основание 23. Деталь 21 в свою очередь является опорой для подвижной детали 22 (внешняя рамка подвеса), на которой размещена вторая пентапризма 11. Призмы в ОШ установлены с возможностью вращения. Углы поворотов блоков деталей 6, 7, 9, 21 (α_I) и 10, 11, 13, 22 (α_{II}) регистрируются соответственно ФЭП 3, 4. Диапазон указанных углов — от 0 до 360° . На гранях

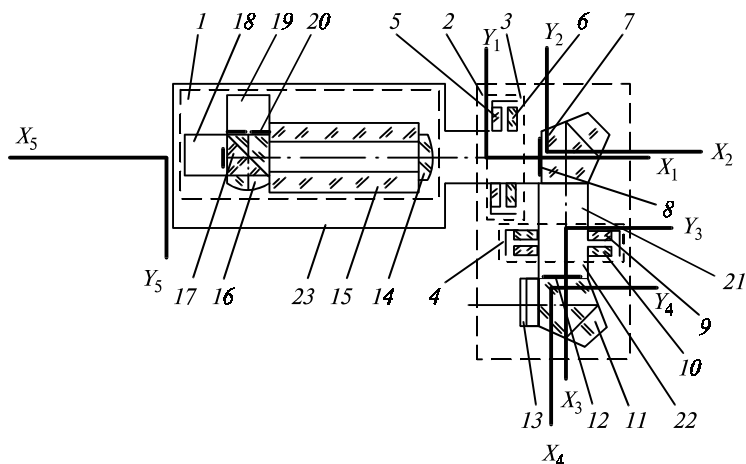


Рис. 3.11. Оптическая система адаптивного угломера в двухступенном подвесе: 1 — фотоэлектрический автоколлиматор; 2 — оптический шарнир; 3, 4 — фотоэлектрические преобразователи (датчики угла поворота); 5, 9 — кодовые лимбы; 6 — считывающий диск; 7, 11 — пентапризма; 8, 12 — селективные отражатели; 10 — считывающий диск; 13 — затвор; 14 — объектив; 15 — корпус; 16 — сферическое зеркало; 17 — светоделительная куб-призма; 18 — ПЗС; 19 — осветитель; 20 — точечная диафрагма; 21 — внутренняя рамка; 22 — внешняя рамка подвеса; 23 — основание

призм 7, 11 нанесены селективные отражательные покрытия (светоделители) 8, 12. Покрытие призмы 8 отражает излучение с длиной волн λ_1 , а покрытие призмы 12 — излучение с λ_2 . Эти длины волн разнесены по спектру. Оптический шарнир пропускает излучение в спектральном диапазоне $\Delta\lambda$. Оптическая система автоколлиматора 1 представляет собой моноблок жестко соединенных деталей 14–17, 20. К этому моноблоку присоединены ПЗС 18 и осветитель 19, который по командам процессора может излучать свет с длинами волн λ_1 , λ_2 , λ_3 . Излучение с λ_3 , пройдя точечную диафрагму 20, сфокусируется сферическим зеркалом 16 на матрице ПЗС 18, которая расположена в фокальной плоскости объектива 14. Автоколлиматор определяет угловые координаты точечных изображений бликов, отраженных от селективных отражательных покрытий ОШ и угловые координаты точечной цели (например, звезды), излучение которой, пройдя ОШ в диапазоне $\Delta\lambda$, поступает в автоколлиматор.

Геометрическая схема прибора определяется взаимным расположением пяти его элементов: рамок 21, 22, двух пентапризм 7, 11 и автоколлиматора 1. Поэтому введем в каждый указанный элемент прямоугольную СК, как это изображено на рис. 3.11. ОШ показан в исходном положении ($\alpha_1 = \alpha_{II} = 0$) при номинальной геометрии. Поэтому пять указанных СК $X_0 Y_0 Z_0$ расположены

ортогонально. Их оси Z направлены в сторону наблюдателя. При повороте считывающего диска 6 относительно основания 23 на угол α_I СК $X_2Y_2Z_2$ (и связанные с ней СК $X_3Y_3Z_3$ и $X_4Y_4Z_4$) повернутся вокруг оси X_2 также на угол α_I относительно СК $X_1Y_1Z_1$. Аналогично при повороте считывающего диска 10 относительно рамки 21 на угол α_{II} СК $X_4Y_4Z_4$ повернется вокруг оси X_4 относительно СК $X_3Y_3Z_3$ на угол α_{II} .

Результаты нарушения номинальной геометрии этого угломерного прибора можно представить в виде двух гипотетических клиньев [25, 28]. Первый жестко соединен с плоскостью основания 23 или рамки 21 , параллельной грани пентапризмы 7 , на которую нанесен селективный отражатель 8 . Второй клин жестко соединен с плоскостью рамки 21 или рамки 22 , параллельной грани пентапризмы 11 , на которую нанесен селективный отражатель 12 . Конкретизация того, с чем жестко соединен клин, определяет математическую модель нарушения геометрической схемы угломера. Будем считать, что углы клиньев малы (единицы угловых минут) и неизвестны. При нарушении геометрии ФЭП с двумя диаметрально установленными отсчетными системами является практически нерасстраиваемым по отношению малых наклонов кодового лимба относительно считывающего диска, а также их небольшого эксцентриситета [35].

Линия визирования угломера определяется лучом (вектором), вышедшим из центра диафрагмы 20 и прошедшим узловую точку объектива 14 . Этот вектор совпадает и с вектором, проходящим через узловую точку объектива 14 и центр точечного изображения диафрагмы 20 , построенного сферическим зеркалом 16 на матрице ПЗС. Ось X_5 приборной (опорной) СК $X_5Y_5Z_5$ геометрически совпадает с выходящим из автоколлиматора указанным вектором. Этот вектор (луч), пройдя через ОШ, и будет определять искомое угловое положение линии визирования в пространстве предметов прибора. Плоскость Y_5Z_5 совмещена с плоскостью анализа ПЗС. При наличии в этой плоскости точечного изображения, сформированного излучением с длиной волны λ_m (λ_1 или λ_2), автоколлиматор определяет его угловые координаты $\Delta\beta_{\lambda_m}$, $\Delta\gamma_{\lambda_m}$ (относительно точечного изображения с λ_3 , относительно начала СК $X_5Y_5Z_5$). $\Delta\beta_{\lambda_m}$ — угол между лучом, прошедшим через узловую точку объектива и плоскостью X_5Y_5 , $\Delta\gamma_{\lambda_m}$ — угол между указанным лучом и плоскостью X_5Z_5 . Значения этих углов не превышает единицы угловых минут. Поэтому их можно рассматривать как направляющие косинусы векторов $A_m(\lambda_m)$, описывающих угловое положение указанных двух точечных изображений в СК $X_5Y_5Z_5$:

$$A_m(\lambda_m) = A_{X_m} \mathbf{i} + A_{Y_m} \mathbf{j} + A_{Z_m} \mathbf{k} - l\mathbf{i} + \Delta\gamma_{\lambda_m} \mathbf{j} + \Delta\beta_{\lambda_m} \mathbf{k}.$$

Искомое угловое положение линии визирования в пространстве предметов угломерного прибора в опорной СК $X_5Y_5Z_5$ описывает вектор A_5 . Для номинальной геометрии достаточно просто получить

$$A_5 = A_{X_5} \mathbf{i} + A_{Y_5} \mathbf{j} + A_{Z_5} \mathbf{k} = \cos \alpha_{II} \mathbf{i} - \sin \alpha_I \sin \alpha_{II} \mathbf{j} - \cos \alpha_I \sin \alpha_{II} \mathbf{k}.$$

Для простоты изложения примем, что опорная и базовая СК совпадают. Работу угломерного прибора кратко можно описать следующим образом. Имеется априорная информация о положении точечной цели в приборной СК $X_5Y_5Z_5$, на основе которой после соответствующей отработки приводов ОШ в угловом поле прибора располагается точечная цель. При открытом затворе 13 ОШ устанавливается в рабочее положение (точечное изображение визирной цели в автоколлиматоре совмещено с началом СК Y_5Z_5). (Вопросы вращения изображения при работе оптического визира здесь рассматривать не будем.)

С ФЭП 3, 4 (рис. 3.11) в процессор поступают значения α_I , α_{II} . Затем затвор закрывается. Включается источник излучения автоколлиматора, и происходит последовательное переключение двух селективных светофильтров или двух селективных светодиодов. В результате из автоколлиматора последовательно выходят два параллельных пучка лучей, каждый из которых имеет свою длину волны λ_m . Каждый пучок лучей, отразившись в ОШ от своего селективного отражателя, вернется в автоколлиматор и сфокусируется в точечное изображение на плоскости Y_5Z_5 . Два последовательно возникающих на плоскости Y_5Z_5 точечных изображения должны нести необходимую информацию о параметрах двух указанных клиньев. Автоколлиматор, произведя измерение угловых положений двух изображений, выдает в процессор значения $\Delta\beta_{\lambda_m}$, $\Delta\gamma_{\lambda_m}$. В процессоре на основе полученной информации и математических выражений (будут представлены ниже) происходит определение направляющих косинусов A_5 .

Направляющие косинусы A_5 однозначно определяют угловое положение цели в СК $X_5Y_5Z_5$. На основе их значений определяют сферические координаты искомой цели.

В результате проведенного математического моделирования нарушения геометрической схемы данного угломера [25, 28, 35] получены следующие выражения направляющих косинусов вектора визирной линии в СК $X_5Y_5Z_5$, в которых нарушения геометрии прибора выражены через его результаты измерений:

$$A_{X_5} = \cos \alpha_I + 0,5 A_{Y_1} \sin \alpha_I \sin \alpha_{II} + 0,5 A_{Z_1} \cos \alpha_I \sin \alpha_{II} + \\ + 0,5 A_{Y_2} \sin \alpha_{II} \sin (\alpha_I + \alpha_{II}) + 0,5 A_{Z_2} \sin \alpha_{II} \cos (\alpha_I + \alpha_{II});$$

$$A_{Y_5} = -\sin \alpha_I \sin \alpha_{II} + 0,5 A_{Y_1} \sin \alpha_I \sin (\alpha_I + \alpha_{II}) + 0,5 A_{Z_1} \cos \alpha_I \sin (\alpha_I + \alpha_{II}) + \\ + 0,5 A_{Y_2} \sin \alpha_I \cos \alpha_{II} \sin (\alpha_I + \alpha_{II}) + 0,5 A_{Z_2} \sin \alpha_I \cos \alpha_{II} \cos (\alpha_I + \alpha_{II});$$

$$\begin{aligned}
A_{Z_5} = & -\cos \alpha_I \sin \alpha_{II} + 0,5 A_{Y_1} \sin \alpha_I \cos (\alpha_I + \alpha_{II}) + \\
& + 0,5 A_{Z_1} \cos \alpha_I \cos (\alpha_I + \alpha_{II}) + 0,5 A_{Y_2} \cos \alpha_I \cos \alpha_{II} \sin (\alpha_I + \alpha_{II}) + \\
& + 0,5 A_{Z_2} \cos \alpha_I \cos \alpha_{II} \cos (\alpha_I + \alpha_{II}),
\end{aligned}
\tag{3.19}$$

где α_I , α_{II} — соответственно результаты измеренных углов поворота ФЭП 3, 4; A_{Y_1} , A_{Z_1} — результаты измерений автоколлиматором угловых координат изображения точечного блика с длиной волны λ_1 , отраженного от селективного отражателя 8; A_{Y_2} , A_{Z_2} — результаты измерений автоколлиматором угловых координат изображения точечного блика с длиной волны λ_2 , отраженного от отражателя 12.

Таким образом, в полученных выражениях нет параметров нарушения геометрии угломера (есть только результаты измерений), и поэтому данный угломерный прибор является адаптивным.

Следует отметить, что затвор 13 здесь введен для наглядности изложения. На самом деле в современных звездных приборах изображения калибрационных меток на фоне изображения звездного неба могут различаться по приданным им характерным признакам (по временной модуляции, по амплитуде сигнала и т.д.)

Второй адаптивный самокалибрующийся угломер. Является модификацией рассмотренного выше оптического шарнира. Следует также иметь в виду, что наиболее распространенными угломерными двухкоординатными приборами с подвижной линией визирования (в том числе и звездные приборы) являются приборы типа теодолита. Их нерасстраиваемость обеспечивается усложнением процедуры измерений (метод круговых приемов), которая не позволяет проводить угловые измерения быстропротекающих процессов. Поэтому здесь будет рассмотрена оптическая система адаптивного угломера как простое сочетание ОЭП типа обычного кодового теодолита и пространственного шарнира [31, 35].

Оптическая система угломера в положении подвеса I и II приведены на рис. 3.12 и 3.13. Оптические элементы входят в соответствующие функциональные узлы угломера. Фотоэлектрический автоколлиматор состоит из элементов 1–12. В датчики углов поворота, выполненные в виде ФЭП 31, 40, входят соответственно оптические элементы 27, 30 и 36, 39. Пространственный ОШ состоит из призм 23, 26, 32, 35, 41. Элементы 1–27 установлены на внутренней рамке подвеса 47, на внешней рамке 46 размещены 30–36, а в неподвижном основании 45 установлены 39–44. Рамки 46 и 47 могут разворачиваться соответственно вокруг вертикальной и горизонтальной осей подвеса в диапазоне углов от 0 до 360°.

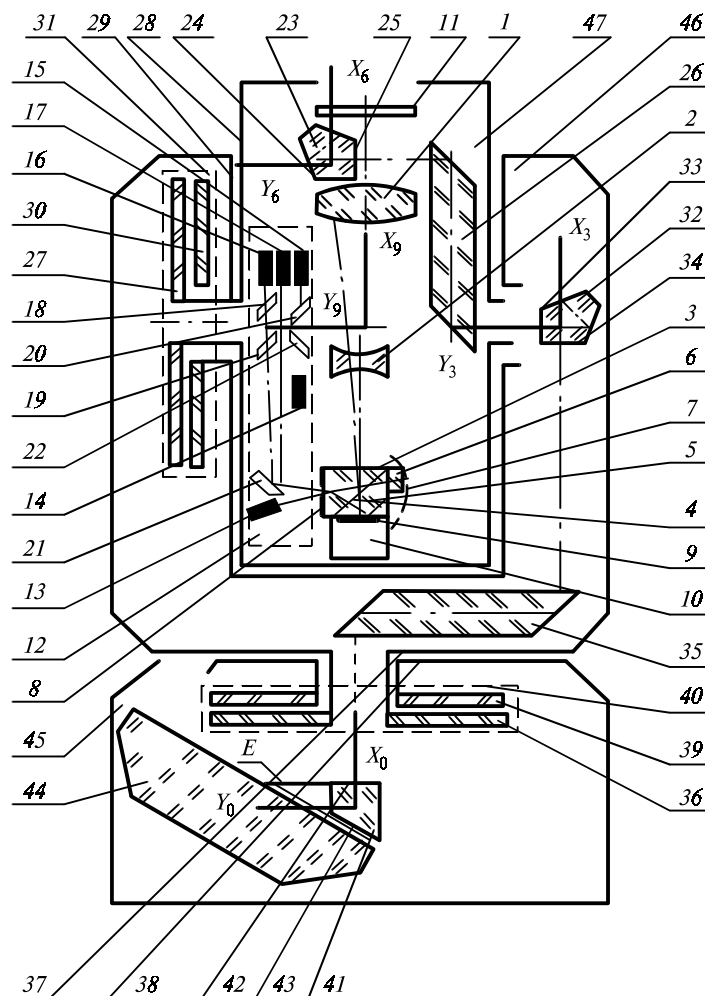
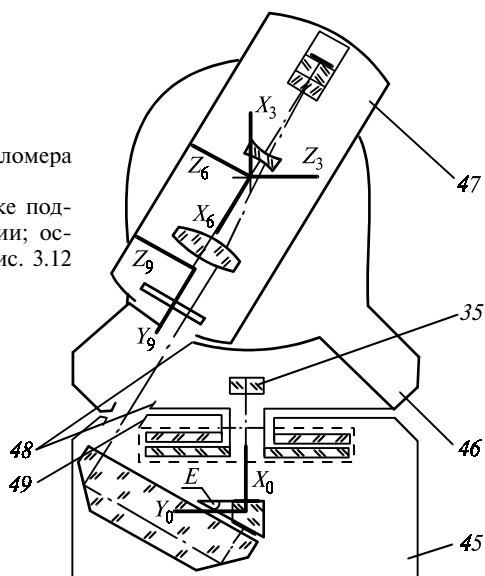


Рис. 3.12. Оптическая система угломера в положении подвеса I:

1, 2 — положительный и отрицательный компоненты телеобъектива; 3 — призма; 4 — светоделиТЕЛЬ; 5 — прямоугольная призма АП-90°; 6 — призма со сферической поверхностью; 7 — сферическое зеркало; 8 — точечная диафрагма; 9 — матрица чувствительных элементов; 10 — координатор; 11 — затвор; 12 — осветитель; 13–17 — источники света; 18, 19 — светоделители; 20–22 — зеркала; 23, 32 — пентапризмы; 24, 33 — входные грани пентапризмы и светоделиТЕЛЬ; 25, 34 — выходные грани пентапризмы; 26, 35 — ромб-призмы; 27, 36 — кодовые лимбы; 28 — «плоскость оси» внутренней рамки подвеса; 29 — «плоскость опоры» внешней рамки; 30, 39 — считывающие диски; 31, 40 — ФЭП; 37 — «плоскость оси» внешней рамки подвеса; 38 — «плоскость опоры» основания; 41 — призма; 42, 43 — грани призмы и зеркала; 44 — уголкоый отражатель; 45 — основание; 46 — внешняя рамка; 47 — внутренняя рамка

Рис. 3.13. Оптическая система угломера в положении подвеса П:
48 — отверстие во внешней рамке подвеса; 49 — отверстие в основании; остальные позиции те же, что на рис. 3.12



Системы координат, приведенные на рис. 3.12 и 3.13, относятся к пространству предметов автоколлиматора. СК $X_0Y_0Z_0$ — опорная СК, ее ось X_0 совпадает с нормалью зеркала 42, а ось Y_0 лежит в плоскости, образованной нормалью зеркал 42, 43, угол между которыми известен и равен E . Нормали входной (33) и выходной (34) граней пентапризмы 32 соответственно совпадают с осями Y_3X_3 СК $X_3Y_3Z_3$. Нормали входной (24) и выходной (25) граней пентапризмы 23 соответственно задают угловое положение осей X_6Y_6 СК $X_6Y_6Z_6$. СК $X_9Y_9Z_9$ формирует телеобъектив и нерасстраиваемый блок жестко соединенных оптических элементов 3–8. Следует пояснить, что фокальная плоскость телеобъектива совмещена с матрицей 9, ее мнимое изображение через светоделитель 4 совмещено с точечной диафрагмой 8, а центр кривизны зеркала 7 расположен в центре диафрагмы 8. Поэтому изображение диафрагмы 8, построенное элементами 4, 7, действительное апланатическое и располагается на матрице 9. Ось X_9 совпадает в пространстве предметов автоколлиматора с визирным или главным лучом (вектором), проходящим через главные точки телеобъектива и энергетический центр изображения точечной диафрагмы 7 на матрице 9. Начало СК $X_9Y_9Z_9$ и плоскость X_9Y_9 соответственно оптически сопряжены с указанным точечным изображением на матрице 9 и самой плоскостью матрицы 9. При этом ориентация ортогональной структуры матрицы чувствительных элементов 9 ПЗС координатора 10 и задает угловое положение осей Y_9Z_9 .

Назначение угломера — определение сферических координат цели $A_{\text{и}}$, $H_{\text{и}}$ — искомые азимутальный и высотный углы, измеренные в СК $X_0Y_0Z_0$, в которой Y_0 принята за полярную, а X_0 — за зенитную ось. Здесь и далее для простоты изложения принимаем, что опорная и базовая СК совпадают. Под целью понимаем бесконечно удаленный точечный источник излучения (например, звезда). Будем считать, что перед измерениями имеется априорная информация о координатах цели: соответственно $A_{\text{а}}$, $H_{\text{а}}$ — априорные азимутальный и высотный угол. Перечисленные углы связаны соотношением

$$A_{\text{и}} = A_{\text{а}} + \Delta A, H_{\text{и}} = H_{\text{а}} + \Delta H,$$

где ΔA , ΔH — углы, характеризующие погрешность наведения на цель линии визирования угломера. Угловое поле телеобъектива 1, 2 больше телесного угла ($2\Delta A \times 2\Delta H$). При эксплуатации угломера рамки его подвеса и соответствующие СК занимают три положения (ПП I, ПП II, ПП III), которые поясняются табл. 3.2.

Таблица 3.2

Три положения рамок подвеса и углы
фотоэлектрических преобразователей 31, 40

Положение подвеса	Угол с ФЭП 40	Угол с ФЭП 31	Номер рисунка	Назначение
I	0°	0°	3.12	Хранение, транспортировка
II	90°	180° – E	3.13	Основная калибровка
III	90° + $A_{\text{а}}$	90° + $H_{\text{а}}$	—	Визирование цели, дополнительная калибровка

Три функциональных узла угломера: автоколлиматор, ФЭП 31, 40 — подключены к специализированной приборной ЭВМ (процессору), которая служит для управления его работой и обработки информации, поступающей с указанных узлов. ФЭП 31, 40 предназначены соответственно для регистрации углов поворота внутренней и внешней рамок подвеса в ПП II и ПП III. Автоколлиматор служит для получения информации об угловом положении как визируемой цели в ПП III, так и автоколлимационных бликов от отражателей ОШ при калибровке угломера в ПП II и III.

Необходимо отметить, что ряд источников света и светодетекторов оптической системы на рис. 3.12 селективны. Их спектральные свойства (их селективность) описаны в табл. 3.3 [31].

Таблица 3.3

Спектральные свойства (излучение с длиной волны λ_n) источников света и светоделителей

Позиция на рис. 3.12		14	15	16	18	19	24	33
Свето-делитель	Пропускает				λ_3	λ_2, λ_3	λ_2, λ_3	λ_3
	Отражает				λ_2	λ_1	λ_1	λ_2
Источник света		λ_1	λ_2	λ_3				

Остальные элементы схемы неселективны. При работе осветителя 12 из автоколлиматора поочередно выходят параллельные пучки лучей различного спектрального состава, которые в СК $X_9Y_9Z_9$ можно описать одним вектором $\mathbf{B} = l\mathbf{i}$. Указанные лучи, отразившись от того или иного плоского отражателя при соответствующем положении подвеса, вернутся обратно в автоколлиматор (СК $X_9Y_9Z_9$) в виде автоколлимационных бликов. Эти отраженные лучи (векторы) приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Векторы, описывающие отраженные лучи

Источник	Отражатель	ПП	Выражения лучей в СК $X_9Y_9Z_9$
16	Зеркало 42	II	$\mathbf{B}'_1(\lambda_3) = -l\mathbf{i} + \Delta B'_{1Y_9}\mathbf{j} + \Delta B'_{1Z_9}\mathbf{k}$
		III	$\mathbf{B}''_1(\lambda_3) = -l\mathbf{i} + \Delta B''_{1Y_9}\mathbf{j} + \Delta B''_{1Z_9}\mathbf{k}$
17	Зеркало 43	II	$\mathbf{B}'_{11} = -l\mathbf{i} + \Delta B'_{11Y_9}\mathbf{j} + \Delta B'_{11Z_9}\mathbf{k}$
15	Светоделитель 33	II	$\mathbf{B}'_{111}(\lambda_2) = -l\mathbf{i} + \Delta B'_{111Y_9}\mathbf{j} + \Delta B'_{111Z_9}\mathbf{k}$
		III	$\mathbf{B}''_{111}(\lambda_2) = -l\mathbf{i} + \Delta B''_{111Y_9}\mathbf{j} + \Delta B''_{111Z_9}\mathbf{k}$
14	Светоделитель 24	II	$\mathbf{B}'_V(\lambda_1) = -l\mathbf{i} + \Delta B'_{VY_9}\mathbf{j} + \Delta B'_{VZ_9}\mathbf{k}$

Лучи, идущие от цели к угломеру, при ПП III записываются в СК $X_9Y_9Z_9$

$$\mathbf{C}' = -l\mathbf{i} + \Delta C''_{Y_9}\mathbf{j} + \Delta C''_{Z_9}\mathbf{k},$$

а в СК $X_0Y_0Z_0$

$$\mathbf{C}'' = C''_{X_0}\mathbf{i} + C''_{Y_0}\mathbf{j} + C''_{Z_0}\mathbf{k}.$$

Принцип действия угломера сводится к следующему. Затвор 11 закрыт. Угломер переведен в ПП II. По командам с ЭВМ осуществляется основная калибровка угломера. Последовательно включаются источники света 13–17 и из осветителя 12 через диафрагму 8 поочередно выходят пять пучков лучей. Первый пучок засвечивает только сферическое зеркало 7, которое строит

изображение диафрагмы 8 на матрице 9, формирующее начало СК $X_9Y_9Z_9$.

Второй, третий, четвертый пучки (соответственно с длинами волн $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) засвечивают только входную грань 24 ОШ. Затвор 11 открывается, и пятый пучок засвечивает только отверстия 48, 49. Второй, третий, четвертый, пятый пучки, соответственно отражаясь на светоделителях 24, 33, зеркалах 42, 43, возвращаются обратно в автоколлиматор как $\mathbf{B}'_V(\lambda_1)$, $\mathbf{B}'_{III}(\lambda_2)$, $\mathbf{B}'_I(\lambda_3)$, $\mathbf{B}'_{II}$ и последовательно формируются в изображения на матрице 9. Координатор 10 производит измерение и обработку координат очередного возникающих изображений автоколлимационных бликов и выдает в процессор значения направляющих косинусов векторов в СК $X_9Y_9Z_9$: $\Delta B'_{VY_9}$, $\Delta B'_{VZ_9}$, $\Delta B'_{IIY_9}$, $\Delta B'_{IIZ_9}$, $\Delta B'_{IY_9}$, $\Delta B'_{IZ_9}$, $\Delta B'_{IIY_9}$, $\Delta B'_{IIZ_9}$. Угломер переводится в III ПП, производится визирование цели, измерение, обработка координат ее изображения на матрице 9, и из автоколлиматора в процессор передаются измеренные $\Delta C''_{Z_9}$, $\Delta C''_{Z_9}$. Затвор 11 закрывается, и начинается дополнительная калибровка угломера. Последовательно включаются источники света 15, 16. Из автоколлиматора выходят шестой и седьмой пучки лучей, которые, соответственно отразившись на зеркалах 33, 42, вернутся в автоколлиматор как векторы $\mathbf{B}''_{III}(\lambda_2)$ и $\mathbf{B}''_I(\lambda_3)$ и поочередно сфокусируются на матрице 9. После измерения и этих изображений из автоколлиматора в процессор поступят значения направляющих косинусов $\Delta \mathbf{B}''_{IIY_9}$, $\Delta \mathbf{B}''_{IIZ_9}$, $\Delta \mathbf{B}''_{IY_9}$, $\Delta \mathbf{B}''_{IZ_9}$.

Далее процессор, располагая информацией, полученной с ФЭП 31, 40 в виде углов A_a , H_a и с автоколлиматора в виде полученных значения направляющих косинусов векторов (табл. 3.4) и вектора $\mathbf{C}''$, а также углом E , по определенному алгоритму на основе математических выражений, которые будут представлены ниже, производит вычисления искоемых координат цели $A_{и}$, $H_{и}$.

Нарушение геометрии этого угломерного прибора аналогично вышеизложенному прибору с оптическим шарниром [31, 35].

В результате проведенного математического моделирования нарушения геометрической схемы данного угломера [31, 35] получены следующие выражения направляющих косинусов вектора визирной линии в СК $X_0Y_0Z_0$, в которых нарушения геометрии прибора выражены через его результаты измерений (углы A_a , H_a , E , часть направляющих косинусов векторов табл. 3.4, $\Delta C''_{Y_9}$, $\Delta C''_{Z_9}$)

$$\begin{aligned} \mathbf{C}'' = C''_{X_0} \mathbf{i} + C''_{Y_0} \mathbf{j} + C''_{Z_0} \mathbf{k} = & (-\sin H_a + P \cos H_a) \mathbf{i} + (-\cos A_a \cos H_a + \\ & + R \sin A_a + Q \sin A_a \cos H_a - \cos A_a P \sin H_a) \mathbf{j} + (-\sin A_a \cos H_a - \\ & - R \cos A_a - Q \cos A_a \cos H_a - \sin A_a P \sin H_a) \mathbf{k}, \end{aligned} \quad (3.20)$$

где

$$P = \Delta C''_{Z_9} + 0,5 [-\Delta B'_{II Z_9} + (\Delta B'_{IZ_9} - \Delta B'_{III Z_9}) \cos E + (\Delta B'_{I Y_9} - \Delta B'_{III Y_9}) \sin E + (\Delta B''_{IZ_9} - \Delta B''_{III Z_9}) \sin H_a - (\Delta B''_{I Y_9} - \Delta B''_{III Y_9}) \cos H_a];$$

$$R = -\Delta C''_{Y_9} + 0,5 [\Delta B''_{III Y_9} + \sin^2 H_a (\Delta B''_{I Y_9} - \Delta B''_{III Y_9}) + \sin H_a \cos H_a (\Delta B''_{IZ_9} - \Delta B''_{III Z_9})];$$

$$Q = \left\{ 0,5 \left[(\Delta B'_{II Y_9} - \Delta B'_{III Y_9}) - (\Delta B'_{I Y_9} - \Delta B'_{III Y_9}) \cos^2 E + \right. \right. \\ \left. \left. + (\Delta B'_{IZ_9} - \Delta B'_{III Z_9}) \sin E \cos E \right] \right\} \cdot \sin^{-1} E;$$

Таким образом, в полученное выражение не вошли параметры нарушения геометрии угломера, а имеются только результаты измерений и паспортный параметр E . Поэтому данный угломерный прибор адаптивный. Следует подчеркнуть, что рассмотренная оптическая система, как и обычный теодолит, не имеет вращения изображения цели по матрице ПЗС.

Выше в данном разделе рассматривались адаптивные угломеры, основанные преимущественно на методе самокалибровки. Применение в них нерасстраиваемых оптических элементов и методов проектирования нерасстраиваемых оптических систем носило вспомогательный характер. В то же время очевидно, что равноправное сочетание методов самокалибрующихся и нерасстраиваемых систем может решить ряд проблем обоих методов. Так как возможное количество оптических систем, основанных на сочетаниях указанных методов, может быть очень велико, то проиллюстрируем преимущества сочетания этих методов на конкретном примере адаптивного комбинированного угломерного инструмента (третий пример).

Из вышеизложенного следует, что адаптивный угломер типа теодолита можно создать на основе как нерасстраиваемых (рис. 3.7), так и самокалибрующихся (рис. 3.12) систем. Однако для них характерны следующие недостатки. Нерасстраиваемая оптическая система на основе концентрического объектива имеет конструктивное ограничение по высотному углу. Изготовление угломерной двумерной высокоточной сетки на большой площади сферической поверхности концентрического объектива является уникальной технологической задачей, требующей специального прецизионного технологического оборудования. В то же время, если создать адаптивный угломер, в котором можно было бы установить вертикально нерасстраиваемую оптическую систему

на основе коллиматора с кольцевым полем [30, 35], то указанные проблемы исключаются.

Эти проблемы отсутствуют и при реализации адаптивного угломера типа теодолита (рис. 3.12) на основе самокалибрующегося пространственного шарнира. Однако здесь имеют место следующие сложности. По нашему мнению, алгоритмы вычисления угловых координат цели на основе полученных математических выражений типа (3.19) или (3.20) сложнее алгоритмов, используемых в адаптивных угломерах с ЭКОС, основанных на выражениях (3.18).

Следует также отметить, что в данной работе геометрия оптических элементов принималась номинальной. На практике для уменьшения стоимости изделий целесообразно использовать оптические элементы, имеющие неноминальную геометрию. Например, вполне допустимо использовать ромб-призму, обладающую остаточной (технологической) клиновидностью. При этом следует лишь паспортизировать эту неноминальность (клиновидность) и ввести ее в выражение (3.20) в виде некоторых постоянных значений, что приведет к усложнению как этих выражений, так и алгоритмов на основе этих выражений. Поэтому уменьшение количества оптических элементов в самокалибрующихся системах типа ОШ является важной практической задачей.

Рассмотренные проблемы решаются в следующем угломерном приборе типа теодолита [29, 35], в котором обеспечено оптимальное сочетание методов самокалибровки и нерасстраиваемых оптических систем.

Третий адаптивный угломерный инструмент (рис. 3.14). Функционально рассматриваемый угломерный инструмент можно разделить на угломерный прибор 1, датчик угла поворота 2, выполненный в виде ФЭП, автоколлиматор 3 и специализированный приборный процессор. Инструмент содержит два блока оптических элементов: верхний (4–20) и нижний (21–29). С каждым блоком связана своя система координат: с верхним — подвижная СК $X_3Y_3Z_3$, с нижним — неподвижная (опорная) СК $X_0Y_0Z_0$. Оптические элементы 4–29 размещены в двухступенном подвесе, который состоит из неподвижного основания 32, внешней рамки 31, установленной с возможностью вращения относительно вертикальной оси X_0 , и внутренней рамки 30, установленной с возможностью вращения относительно горизонтальной оси Y_3 . Диапазон углов поворота каждой рамки от 0 до 360°. Нижний и верхний блоки установлены в основании 32, на рамках 30 и 31.

Угломерный инструмент предназначен для измерения угловых сферических координат точечной цели $A_{0и}$, $H_{0и}$, где $A_{0и}$,

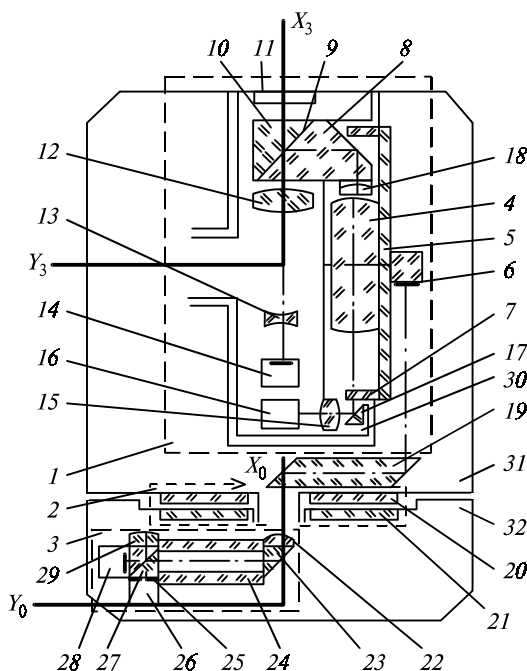


Рис. 3.14. Оптическая система угломерного инструмента:

1 — угломерный прибор; 2 — ФЭП; 3 — автоколлиматор; 4 — concentрический объектив (линза-шар); 5 — пластина; 6 — плоское зеркало; 7 — сетка с прозрачными штрихами угломерной сетки; 8 — призма БкР-180°; 9 — светоделиватель; 10, 23 — прямоугольные призмы; 11 — затвор; 12, 13 — положительный и отрицательный компоненты телеобъектива; 14, 28 — фотоприемные блоки; 15 — конденсор; 16 — излучатель; 17 — зеркало; 18 — афокальный компенсатор; 19 — ромб-призма; 20 — кодировый лимб; 21 — считывающий диск; 22 — объектив (плосковыпуклая линза); 24 — корпус (полый цилиндр); 25 — точечная диафрагма; 26 — осветитель; 27 — светоделивательная куб-призма; 29 — сферическое зеркало; 30 — внутренняя рамка; 31 — внешняя рамка; 32 — основание

$H_{0и}$ — соответственно горизонтальный и вертикальный углы точечной цели (например, звезды), измеренные относительно СК $X_0Y_0Z_0$, в которой Y_0, X_0 — соответственно приняты за полярные и зенитные оси. Угловое положение цели определяется единичным вектором $\mathbf{B}$ (2 на рис. 3.15, а). Угловое положение линии визирования (штриховая прямая 1 на рис. 3.15) в пространстве предметов инструмента определяется лучом, проходящим через главные точки concentрического объектива 4 (рис. 3.14) и центр чувствительной площадки фотоприемного блока 14.

Описание и принцип действия угломерного прибора, ФЭП и автоколлиматора были приведены выше. Поэтому далее будут даны лишь краткие пояснения, которые необходимы в рамках данного раздела.

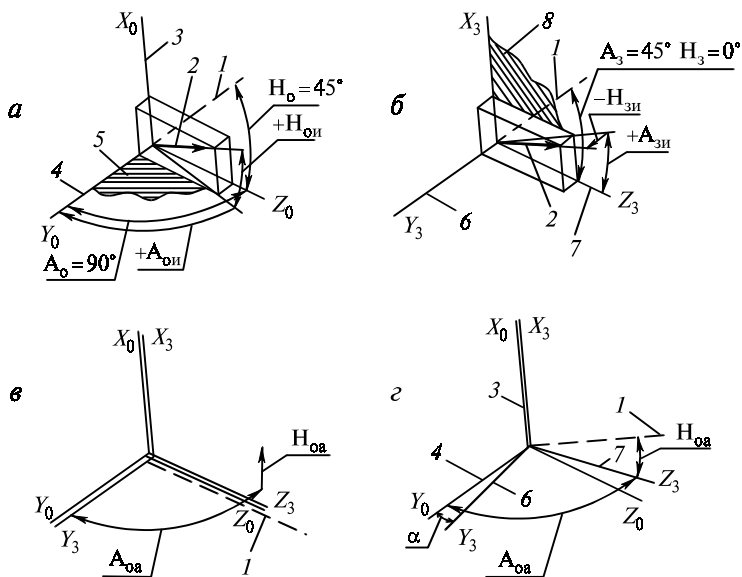


Рис. 3.15. Неподвижная $X_0Y_0Z_0$ и подвижная $X_3Y_3Z_3$ системы координат угломерного инструмента:

1 — линия визирования инструмента; 2 — вектор $\mathbf{B}$, направленный на точечную цель; 3–5 — соответственно зенитная ось, полярная ось, экваториальная плоскость сферической неподвижной системы координат; 6–8 — зенитная ось, полярная ось, экваториальная плоскость сферической системы координат $X_3Y_3Z_3$

Угломерный прибор, установленный в угломерном инструменте, предназначен для измерения угловых сферических координат цели $A_{зи}$, $H_{зи}$, где $A_{зи}$, $H_{зи}$ — соответственно долгота и широта углового положения цели, измеренные относительно СК $X_3Y_3Z_3$, в которой оси Z_3 , Y_3 соответственно приняты за полярные и зенитные оси (рис. 3.15, б). Штрих экватора расположен вертикально (совмещен с плоскостью X_3Z_3), плоскость нулевого меридиана совмещена с плоскостью Y_3Z_3 , а сам концентрический объектив 4 с сеткой 7 установлен (в составе верхнего блока) на рамке 3I.

ФЭП предназначен для измерения угла поворота α верхнего блока относительно нижнего и соответственно угломерного прибора относительно автоколлиматора, СК $X_3Y_3Z_3$ относительно СК $X_0Y_0Z_0$ (рис. 3.15, г). На рис. 3.14 приведены только подвижный кодовый лимб 20 и неподвижный считывающий диск 2I ФЭП. Нормаль плоскости зеркала 6 параллельна оси X_3 .

Автоколлиматор предназначен для измерения углов наклона верхнего блока относительно нижнего и соответственно угломерного прибора относительно автоколлиматора, оси X_3 отно-

сительно оси X_0 в СК $X_0Y_0Z_0$. Указанный наклон, появляющийся в результате нарушения геометрии угломерного инструмента, весьма мал — до нескольких угловых минут. При включении автоколлиматора из него выходит пучок параллельных лучей, описываемый в СК $X_0Y_0Z_0$ как li . После отражения указанного пучка от плоского зеркала b в автоколлиматор входит пучок параллельных лучей, который в СК $X_0Y_0Z_0$ описывается в виде вектора

$$\mathbf{B} = -li + \Delta B'_{Y_0} \mathbf{j} + \Delta B'_{Z_0} \mathbf{k}.$$

В силу малости угловых величин $\Delta B'_{Y_0}$ и $\Delta B'_{Z_0}$ автоколлиматор осуществляет непосредственное измерение этих величин, через которые и выражается отклонение X_3 относительно X_0 .

Сущность способа определения сферических координат цели $A_{0и}$, $H_{0и}$ сводится к следующему. Пусть имеется априорная информация о том, что цель расположена вблизи точки со сферическими координатами $A_{0а}$, $H_{0а}$. Угломерный инструмент находится в исходном положении. При номинальной геометрии инструмента оси X_0 , X_3 , а также оси Z_0 , Z_3 и линии визирования совмещены (рис. 3.15, *е*). При номинальной геометрии угломерного инструмента ось Z_3 , определяемая пересечением штриха экватора и нулевого меридиана, расположена в плоскости Z_0X_0 , а линия визирования — в плоскости Y_3Z_3 . По командам ЭВМ начинает работать привод инструмента, рамка *3l* поворачивается на угол $\alpha = -90^\circ + A_{0а}$, который измеряется ФЭП. Затем поворачивается рамка *30* на угол $A_a = H_{0а}$, который определяется на основе подсчета количества изображений штрихов меридиана, прошедших по площадке фотоприемного блока *14*. Привод останавливается. При номинальной геометрии инструмента линия визирования будет направлена на точку с координатами $A_{0а}$, $H_{0а}$ (рис. 3.15, *з*). Если геометрия инструмента нарушена, то линия визирования будет проходить вблизи указанной точки. Угломерный прибор после процедуры обнаружения цели производит измерение ее сферических координат $A_{зи}$, $H_{зи}$ ($\Delta H_{зи}$) относительно СК $X_3Y_3Z_3$, а автоколлиматор производит определение величин $\Delta B'_{Y_0}$, $\Delta B'_{Z_0}$ в СК $X_0Y_0Z_0$. Далее ЭВМ, располагая результатами измерений угломерного прибора ($A_{зи}$, $H_{зи}$), ФЭП (α) и автоколлиматора ($\Delta B'_{Y_0}$, $\Delta B'_{Z_0}$), по определенной программе производит вычисление искоемых сферических координат цели $A_{0и}$, $H_{0и}$.

Следовательно, непосредственная цель математического моделирования нарушения геометрии инструмента — показать возможность получения функций

$$\begin{aligned} A_{0и} &= f_1[(A_{зи}, \Delta H_{зи}), \alpha, (\Delta B'_{Y_0}, \Delta B'_{Z_0})]; \\ H_{0и} &= f_2[(A_{зи}, \Delta H_{зи}), \alpha, (\Delta B'_{Y_0}, \Delta B'_{Z_0})]. \end{aligned}$$

На основе проведенного математического моделирования [29, 35] получено следующее выражение вектора $\mathbf{B}$ в СК $X_0Y_0Z_0$:

$$\begin{aligned}\mathbf{B} &= B_{X_0} \mathbf{i} + B_{Y_0} \mathbf{j} + B_{Z_0} \mathbf{k} = \\ &= [B_{X_3} + B_{Z_3} (0,5\Delta B'_{Z_0} \cos \alpha - 0,5 \Delta B'_{Y_0} \sin \alpha)] \mathbf{i} + \\ &\quad + (-0,5\Delta B'_{Y_0} B_{X_3} + \Delta B_{Y_3} \cos \alpha - B_{Z_3} \sin \alpha) \mathbf{j} + \\ &\quad + (-0,5 \Delta B'_{Z_0} B_{X_3} + \Delta B_{Y_3} \sin \alpha + B_{Z_3} \cos \alpha) \mathbf{k},\end{aligned}$$

где $B_{X_3} = \cos \Delta H_{\text{зи}} \sin A_{\text{зи}}$; $B_{Y_3} = -\sin \Delta H_{\text{зи}}$; $B_{Z_3} = \cos \Delta H_{\text{зи}} \cos A_{\text{зи}}$.

Таким образом, независимо от деформации геометрии угломерного инструмента, величины $\Delta B'_{Y_0}$, $\Delta B'_{Z_0}$, α , $A_{\text{зи}}$, $\Delta H_{\text{зи}}$ однозначно определяют угловое положение вектора $\mathbf{B}$ в СК $X_0Y_0Z_0$. Искомые углы $A_{0и}$, $H_{0и}$ определяются через полученные направляющие косинусы вектора $\mathbf{B}$ в СК $X_0Y_0Z_0$.

Современная тенденция развития астроприборов реализуется путем создания статических приборов (приборов с неподвижной линией визирования), в которых нет оптико-механического сканирования, и они построены на базе многоэлементных приемников излучения. Указанная тенденция и определила использование различных типов адаптивных угломеров. Разнообразные каналы геометрического эталона нашли достаточно широкое применение в статических астроприборах (особенно в звездных приборах).

Что касается представленных в этом разделе схем адаптивных приборов с подвижной линией визирования, то следует отметить следующее. Несмотря на то, что эти приборы практически не ухудшают точность измерений при нарушении их геометрической схемы в условиях эксплуатации и технологическая база для их реализации была достаточно глубоко проработана, смена тенденции развития астроприборов (от приборов с подвижной линией визирования к статическим приборам) привела к тому, что адаптивные системы с подвижной линией визирования не нашли практического воплощения.

Поскольку узкопольные приборы по сравнению с широкопольными (при прочих равных параметрах) более помехозащищенные, то в дальнейшем при необходимости создания высокоточных звездных приборов с очень высокой помехозащищенностью адаптивные астроприборы с подвижной линией визирования могут найти свое применение на КА.

3.2. Методы борьбы с оптическими помехами (для режимов поиска и селекции)

3.2.1. Методы подавления боковых помех в ОЭП

Бленда как средство борьбы с боковыми помехами

Боковые помехи, т.е. излучатели, находящиеся за пределами углового поля прибора, приводят к появлению в ОЭП дополнительного сигнала, обусловленного рассеянием излучения на элементах оптической системы прибора. Эквивалентная яркость этого свечения в ряде случаев значительно превышает яркость фоновых помех, т.е. помех, находящихся в угловом поле прибора. В некоторых случаях боковые помехи создают в плоскости анализа прибора «сфокусированные» блики. Все это существенно осложняет режим поиска ОЭП. Поэтому в ОЭП видимого диапазона (в основном это звездные приборы) для борьбы с боковыми помехами используются бленды, предназначенные для снижения яркости рассеянного света до значения, меньшего яркости фоновых помех, а также для подавления возможных бликов от этих помех.

Рассмотрим принцип действия бленд на примере простейшей круговой бленды [71] (рис. 3.16), которая представляет собой коническую деталь 1, установленную перед входным зрачком 2 объектива 3 соосно его оптической оси. Свет от боковой помехи 4, пройдя входное окно бленды, рассеивается и поглощается на ее внутренней поверхности, имеющей черное матовое покрытие. Часть рассеянного света через выходное окно бленды доходит до ОЭП, непосредственно освещая преломляющие (отражающие)

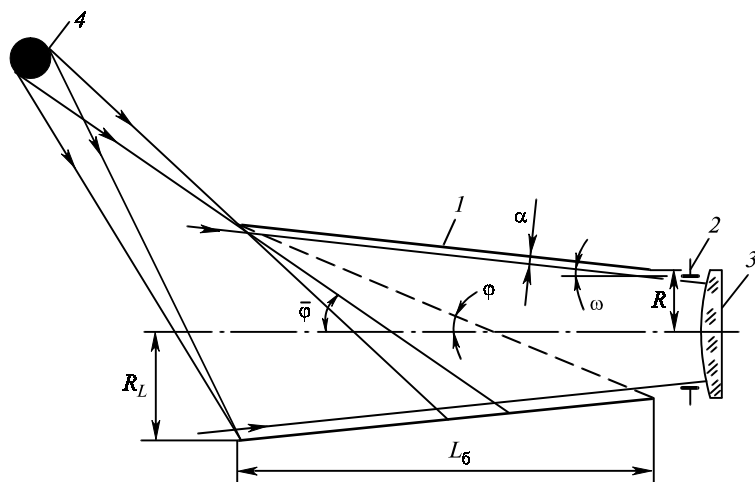


Рис. 3.16. Простейшая круговая бленда

поверхности объектива, цилиндрические нерабочие поверхности его линз, а также внутренние части корпуса прибора, создает некоторую остаточную освещенность на чувствительном слое приемника излучения.

Чтобы не допустить виньетирования полевых рабочих пучков света от визируемого объекта, угол конуса бленды выбирают равным наибольшему угловому полю прибора (2ω). Для исключения непосредственной засветки линейного поля ОЭП внутренняя поверхность бленды должна отстоять от крайних полевых лучей на небольшое расстояние a .

Основными габаритными параметрами бленд являются: радиусы входного R_L и выходного R окон бленды, ее длина L_6 , а также половина углового поля ω . Максимальный угол, образованный оптической осью и лучом, соединяющим кромки входного и выходного окон, называют углом прямой засветки ϕ выходного окна бленды. Во входное окно бленды от боковой помехи проходит пучок лучей. Угол между лучом, образующим с оптической осью наименьший угол, и этой осью называют углом засветки бленды $\bar{\phi}$.

Одним из основных параметров бленды является коэффициент ослабления $k_{\text{осл}}$ — отношение освещенности от боковой помехи на входе бленды к освещенности, создаваемой рассеянным светом на ее выходе, причем $k_{\text{осл}} > 1$. Следует подчеркнуть, что коэффициент ослабления зависит от угла засветки бленды. Как правило, при увеличении угла засветки $k_{\text{осл}}$ возрастает. Угол засветки, при котором коэффициент ослабления бленды достигает заданного значения, называется углом допустимой засветки.

При проектировании ОЭП, снабженных блендами, возникают противоречивые требования. С одной стороны, необходимо уменьшать габаритные размеры и массу бленды, с другой — для уменьшения влияния боковых помех и увеличения углового поля ОЭП приходится увеличивать эти параметры. Поэтому уже на первых этапах проектирования появляется необходимость в проведении анализа влияния габаритных параметров бленд на угол допустимой засветки.

По конструкции бленды можно разделить на:

- двойные ($k_{\text{осл}} = 5 \cdot 10^8$ — тип А, $k_{\text{осл}} = 5 \cdot 10^6$ — тип Б),
- круговые и складные ($k_{\text{осл}} = 0,5 \cdot 10^6$),
- кольцевые и прокачиваемые ($k_{\text{осл}} = 10^5$),
- сотовые ($k_{\text{осл}} = 10^3$).

В скобках указаны значения коэффициентов ослабления бленд с зеркально-матовой внутренней полостью при допустимых углах засветки. В конструкции этих бленд используются

В [71] проведен анализ этих двух оптических систем и получен ряд функциональных зависимостей, с помощью которых обосновано положение о том, что конденсор является эффективным средством борьбы с боковыми помехами, позволяющим использовать бленду с меньшим коэффициентом ослабления $k_{\text{осл}}$. Там же получено выражение для определения требуемого коэффициента ослабления бленды ОЭП в случае боковых помех с относительно небольшими угловыми размерами в виде следующей функциональной зависимости:

$$k_{\text{осл}} = \frac{gk_2 E}{L} = \frac{g(r/\pi)E}{L}, \quad (3.21)$$

где g — величина, показывающая, во сколько раз поток излучения на чувствительном элементе приемника излучения от боковой помехи должен быть меньше потока излучения от фона; k_2 — коэффициент, который определяет степень подавления потока излучения от боковой помехи на его пути от бленды до приемника излучения, ср^{-1} ; r — суммарный коэффициент яркости оптической системы.

Из выражения (3.21) следует, что чем меньше яркость фоновых помех, тем больше коэффициент ослабления бленды и тем сложнее ее конструкция.

Преобразуя выражение (3.21), получаем формулу для оценки средней освещенности в фокальной плоскости объектива ОЭП

$$E_{\Phi} = \frac{Er\tau}{4k_{\text{осл}}} \left(\frac{D}{f'} \right)^2,$$

где f' , D , τ — соответственно фокусное расстояние, диаметр входного зрачка и коэффициент пропускания объектива.

Как показывает практика, значения r имеют существенный разброс. Для схем А это значение составляет до 0,1–0,3. Для этих схем важно обеспечить уменьшение отражательной способности нерабочих поверхностей объектива. Для этого во внутренней полости прибора устанавливают дополнительную систему кольцевых диафрагм. Для схем Б значение r составляет до 0,02–0,10. Следует также отметить, что при прочих равных условиях линзовые объективы имеют, как правило, меньшее значение r по сравнению с зеркальными (зеркально-линзовыми) объективами.

Рассмотрим пример. Пусть ОЭП выполнен по схеме Б и должен работать на фоне ночного неба ($L = 2 \cdot 10^{-4}$ кд/м²) при наличии боковой помехи Солнца ($E_{\text{вх}} = 1,37 \cdot 10^5$ лк). При этом требуется, чтобы световой поток на приемнике излучения от Солнца был в 10 раз меньше светового потока от ночного неба, т.е. $q = 10$,

$k_{2Б} \approx 0,006 \text{ ср}^{-1}$. Из (3.21) получаем, что коэффициент ослабления бленды при данных условиях составляет примерно $4 \cdot 10^7$.

Сопоставляя полученные значения с приведенными выше данными по значениям коэффициентов ослабления современных бленд, можно сделать вывод, что в данном случае необходимо проектировать двойную бленду.

На основе многолетней практики проектирования звездных приборов сложилась обобщенная совокупность методов подавления боковых помех, которая кратко сводится к следующему [26]. Исходными данными служат: максимальная яркость фоновых помех; величина g ; минимальные углы засветки от боковых помех; геометрические и энергетические параметры этих помех; параметры объектива (угловое поле, диаметр входного зрачка, фокусное расстояние и т.д.); тип приемника излучения (одно- и многоэлементный).

Определяется облик оптической системы: тип объектива (линзовый, зеркальный), наличие конденсора, компоновка оптической системы. Прогнозируется значение коэффициента k_2 (3.21). Рассчитывается освещенность на входе бленды от помех и вычисляются требуемые значения коэффициентов ослабления. По этим значениям определяется тип бленды, после чего производится расчет габаритных параметров выбранного типа бленды. На основе полученных габаритных параметров проектируется бленда: производится расстановка диафрагм внутри бленды и рассчитываются коэффициенты ослабления бленды для заданных углов засветки.

Для бесконденсорных оптических систем на этапе непосредственного конструирования объектива особое внимание уделяется минимизации k_2 . Для этого во внутренней полости оптических систем устанавливают дополнительные диафрагмы, искусственно увеличиваются внешние диаметры линз объектива (при сохранении их световых диаметров) и т.д. На последних этапах создания первого опытного образца прибора экспериментально определяется зависимость $k_{\text{осл}} = f(\varphi)$, где φ — угол засветки бленды, и подтверждаются значения g и k_2 .

Наибольшее распространение в ОЭП получили круговые бленды (рис. 3.18), состоящие из цилиндрического корпуса 1 и плоских кольцевых диафрагм 2.

Анализ влияния габаритных параметров круговой бленды на угол прямой засветки φ не вызывает затруднений. Угол φ определяется как

$$\varphi = \arctg \left(\frac{2R}{L_6} + \tg \omega \right). \quad (3.22)$$

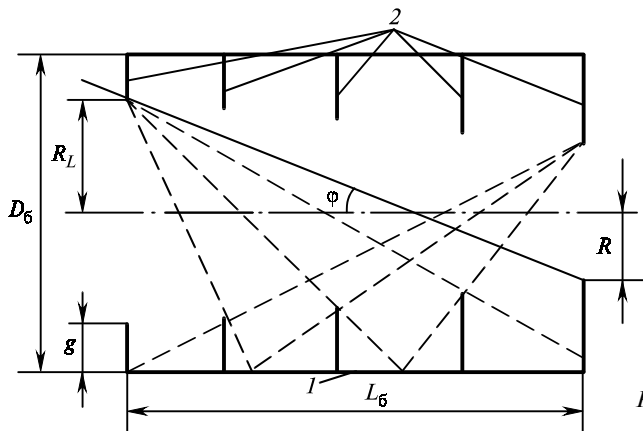


Рис. 3.18. Круговая блenda

Габаритные параметры L_6 и R_L круговой бленды при заданном угле прямой засветки и известных габаритных параметрах объектива вычисляются по формулам

$$L_6 = \frac{2R}{\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \omega}; \quad (3.23)$$

$$R_L = R + L_6 \operatorname{tg} \omega. \quad (3.24)$$

Диаметр бленды

$$D_6 = 2(R_L + g), \quad (3.25)$$

где g — ширина кольцевой зоны первой диафрагмы (глубина первого кармана). Практика проектирования бленд показывает, что для высококачественных круговых бленд g может составлять до 30–50% от диаметра выходного окна.

Таким образом, из формул (3.23), (3.24) следует, что при заданном угле допустимой засветки чем больше угловое поле зрения прибора, тем больше габаритные параметры бленды.

Коэффициент ослабления бленды в значительной степени определяется числом отражений n световых пучков в бленде. При заданном коэффициенте ослабления $k_{\text{осл}}$ на первоначальном этапе проектирования число n подбирают так, чтобы обеспечить соотношение

$$\rho_3^n = k_{\text{осл}}^{-1}.$$

При этом принимают, что коэффициент зеркального отражения диафрагм ρ_3 приближенно равен коэффициенту диффузного отражения бленды.

На рис. 3.18 в качестве примера приведены геометрические построения, используемые для расстановки диафрагм в бленде, обеспечивающих двукратное отражение световых пучков от бо-

ковой помехи. Следует отметить, что, как правило, в круговых блендах число отражений световых пучков не превышает трех-четырех, так как при увеличении n , связанного с увеличением числа диафрагм при выбранном диаметре бленды, доля рассеянного света от кромок диафрагм будет доминировать и, по существу, определять значения коэффициента ослабления.

Расчет коэффициента ослабления бленды для определенного угла засветки сводится к определению суммарной освещенности $E_{\text{вых}}$ от боковой помехи в выходном окне бленды, которая в общем случае определяется из выражения

$$E_{\text{вых}} = \sum_{i=1}^n L_i \Omega_i,$$

где L_i — яркость i -го участка бленды в направлении ее выходного окна; Ω_i — телесный угол, под которым воспринимается i -й участок бленды из выходного окна.

Рассмотрим методику расчета освещенности, создаваемой круговой блендой с зеркально-матовой полостью в заданной точке ее выходного окна [71]. Вначале для определенного угла засветки графически путем построения многократных разверток и анализа хода лучей определяются участки бленды, которые отражают свет в направлении выходного окна.

Определяются освещенности $E_{\text{кр}i}$, создаваемые рассеянным светом от кромок диафрагм в центре выходного окна, по формуле

$$E_{\text{кр}i} = \rho_{\text{кр}} E_{\text{св}} (\sin^2 \sigma_{1\text{кр}} - \sin^2 \sigma_{2\text{кр}}) k_{j\text{кр}},$$

где $\rho_{\text{кр}}$ — коэффициент отражения кромки; $E_{\text{св}}$ — освещенность на кромке; $\sigma_{1\text{кр}}$, $\sigma_{2\text{кр}}$ — внутренние углы, под которыми видны края освещенной части i -й кромки (радиус кромки) из центра выходного окна бленды; $k_{j\text{кр}}$ — коэффициент, равный отношению длины светящейся части кромки к общей ее длине.

Затем вычисляются освещенности $E_{\text{б}j}$, создаваемые светом, рассеянным внутренними элементами бленды (участками ее цилиндрической поверхности и кольцевых диафрагм):

$$E_{\text{б}j} = \pi L_j (\sin^2 \sigma_{1j} - \sin^2 \sigma_{2j}) k_{j\text{б}},$$

где L_j — яркость j -го светящегося участка бленды; σ_{1j} , σ_{2j} — апертурные углы, под которыми видна наибольшая ширина светящегося участка из центра выходного угла бленды; $k_{j\text{б}}$ — коэффициент, равный отношению площади светящегося участка к площади, вырезаемой на поверхности j -го элемента бленды плоскими углами σ_{1j} , σ_{2j} при их вращении вокруг оптической оси бленды.

Яркость отдельных участков бленды

$$L_j = \frac{\rho_3 r_d E \cos \bar{\varphi}}{\pi},$$

где ρ_3 — коэффициент зеркального отражения бленды; r_d — коэффициент яркости диафрагмы (если светящейся поверхностью является не диафрагма, а цилиндрическая поверхность бленды, то вместо r_d следует брать коэффициент отражения этой поверхности); E — освещенность данного участка бленды.

Освещенность участка, засвеченного многократно зеркально отраженным светом,

$$E = E_{\text{св}} \rho_3^n,$$

где n — число зеркальных отражений.

В случае диффузной засветки рассматриваемого кольцевого участка другим участком, освещенным непосредственно от боковой помехи,

$$E = \frac{r_d E_{\text{св}} \sigma_t \sigma_s}{\pi},$$

где σ_t , σ_s — апертурные углы, под которыми видна облучающая первичная поверхность рассматриваемого кольцевого участка.

В заключение расчета производится суммирование найденных освещенностей ($E_{\text{кри}}$, $E_{\text{б}j}$) и определяется коэффициент ослабления бленды.

Изложенная графоаналитическая методика не единственная. Известны и другие методы расчета (в частности, компьютерные программы GUERAP и APART/PADE [74]).

Оптико-электронные приборы, работающие в условиях мощных боковых помех и фоновых помех минимальной яркости, целесообразно снабжать двойными блендами. При этом требование уменьшения угла допустимой засветки и использования современных элементов микроэлектроники приводят к тому, что в ряде случаев двойная бледа является наиболее громоздким элементом звездного прибора. Поэтому становится актуальной задача анализа влияния габаритных параметров двойных бленд на угол допустимой засветки.

Двойная коническая бледа А состоит из двух конических диафрагм, линия сопряжения OO' которых как бы делит бленду на две: основную, непосредственно воспринимающую свет от источника боковой засветки, и дополнительную, обеспечивающую защиту выходного окна от света, отраженного или рассеянного основной блендой (рис. 3.19, тип А). В более общем случае конические диафрагмы можно рассматривать как поверхности, огибающие кромки кольцевых диафрагм. Углом допустимой засветки φ двойной бленды будем называть максимальный угол,

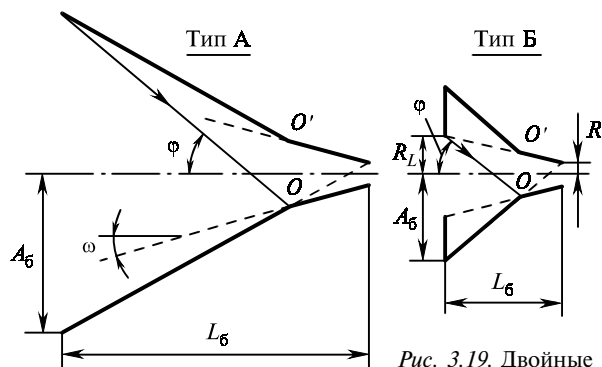


Рис. 3.19. Двойные бленды (тип А, тип Б)

образованный оптической осью и прямой, проходящей через край входного окна и линию OO' .

Для уменьшения габаритных параметров бленды входное окно оформляют в виде плоской кольцевой диафрагмы, внутренний диаметр которой несколько больше максимального светового размера в данном сечении (рис. 3.19, тип Б). При этом выходным окном будет непосредственно восприниматься свет, идущий от кромки и внутренней поверхности первой плоской диафрагмы.

Угол допустимой засветки бленды А

$$\varphi_A = \arctg \left[\frac{(A_6 + R_L)(A_6 + R - L_6 \tg \omega)}{L_6(A_6 - R_L)} - \tg \omega \right],$$

бленды Б

$$\varphi_B = \arctg \left[\frac{2R_L(A_6 + R - L_6 \tg \omega)}{L_6(A_6 - R_L)} - \tg \omega \right],$$

где L_6 — длина бленд; R — радиус выходного окна; $R_L = R + L_6 \tg \omega$ — радиус входного окна бленды Б; ω — половина углового поля; A_6 — минимальный внешний радиус бленд.

Методика определения габаритных параметров двойных бленд (L_6 , A_6) по заданным значениям R , ω , φ дана в [71].

На рис. 3.20 приведена двойная малогабаритная бленда типа Б, в которой для повышения коэффициента ослабления использована система концентрических цилиндрических зеркальных диафрагм, установленных на внутренней стороне входного фланца. На входном фланце укреплена также коническая зеркальная диафрагма.

Данная бленда, как следует из рис. 3.21, обладает коэффициентом ослабления не менее $5 \cdot 10^6$ при углах засветки от 43 до 90° . Эти экспериментальные данные получены с помощью имитатора Солнца, вакуумной камеры и измерительной аппаратуры с селе-

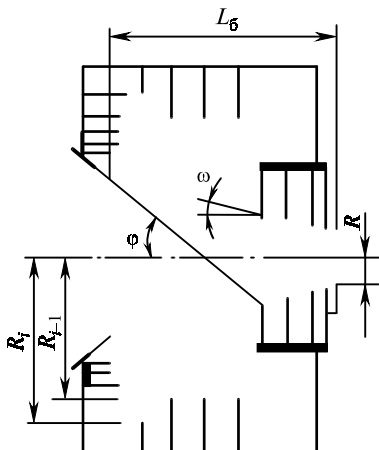


Рис. 3.20. Двойная малогабаритная бленда (типа Б) с системой цилиндрических диафрагм

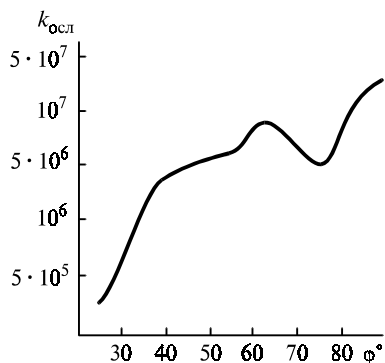


Рис. 3.21. Экспериментальная зависимость $k_{осл}$ двойной малогабаритной бленды от φ

новым приемником излучения. Следует отметить, что для двойных бленд типа А удалось обеспечить коэффициент ослабления не менее $5 \cdot 10^8$ при углах засветки от 30 до 90° . Другими словами, бленды типа А при прочих равных условиях всегда лучше бленд типа Б по коэффициенту ослабления.

Кольцевые бленды [71] целесообразно использовать совместно с узкопольными центрированными зеркальными (зеркально-линзовыми) объективами. В этом случае использование кольцевых бленд вместо круговых приводит к уменьшению продольных габаритных размеров оптической системы. Кольцевая бленда (рис. 3.22) отличается от круговой только тем, что внутри ее расположен полый «стакан», диаметр которого меньше диаметра внутренней зоны кольцевого зрачка зеркального объектива. Эта бленда используется с зеркальными объективами, имеющими нечетное число зеркал. В этом случае во внутренней полости бленды размещается приемник излучения и часть электронного блока. Если используется зеркальный объектив с четным числом зеркал (типа Кассегрена), то указанный стакан вырождается в одну круговую диафрагму (рис. 3.23) [71]. На рис. 3.22, 3.23 бленды показаны упрощенно. На их цилиндрических поверхностях располагаются кромки кольцевых диафрагм.

Анализ влияния габаритных параметров кольцевых бленд на угол прямой засветки проводится с помощью выражения

$$\varphi = \arctg \frac{\left[\left(\sqrt{R_L^2 - r_L^2} + \sqrt{R^2 - r^2} \right) + L_6^2 \operatorname{tg} \omega \right]^{1/2}}{L_6},$$

где L_6 — длина кольцевой бленды; ω — половина углового поля зеркального объектива; R — внешний радиус выходного окна бленды (входного зрачка объектива); r — внутренний размер выходного окна объектива;

$$r_L = r - L_6 \operatorname{tg} \omega;$$

$$R_L = R + L_6 \operatorname{tg} \omega.$$

Методика расчета габаритных параметров кольцевой бленды приведена в [71].

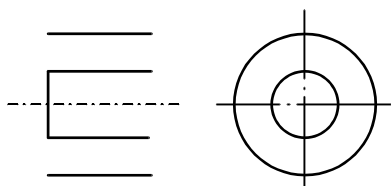


Рис. 3.22. Кольцевая бленда

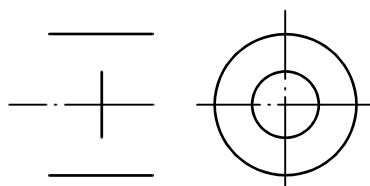


Рис. 3.23. Кольцевая бленда с одной внутренней диафрагмой

Наименьшие габаритные параметры у сотовых бленд, которые представляют собой систему трубчатых элементов, расположенных перед объективом параллельно его оптической оси (рис. 3.24). Очевидно, чем меньше поперечный размер ячейки сотовой бленды, тем меньше ее длина при заданном угле засветки. В звездных приборах сотовые бленды не получили широкого распространения в силу ряда обстоятельств. Сотовые бленды вносят переменное виньетирование рабочих пучков света от визируемого объекта, которое прямо пропорционально угловому полю. Поэтому применять их можно только с весьма узкопольными объективами, в которых, как правило, кружок рассеяния близок к дифракционному. Сотовые бленды также ухудшают качество изображения оптических систем, усиливая дифракционные явления. На практике это качество ухудшается также из-за недостаточно качественной технологии их изготовления.

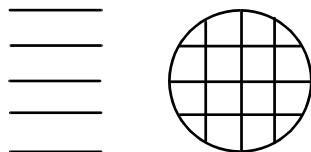


Рис. 3.24. Сотовая бленда

Появление подвижных бленд складной и прокачиваемой (рис. 3.25, 3.26) [26] (на этих рисунках бленды также представлены упрощенно — без диафрагм) объясняется стремлением к существенному уменьшению габаритных параметров бленд, которое может быть достигнуто при некотором усложнении конструкции ОЭП. Складные бленды при транспортировке звездного прибора на КА находятся в сложенном (вдоль оптической оси объектива) состоянии и раскрываются при работе прибора на КА.

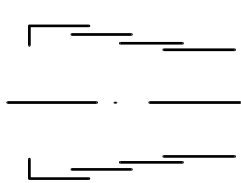


Рис. 3.25. Складная бленда

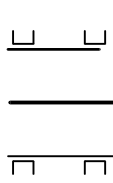
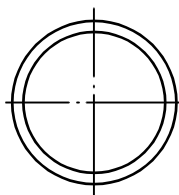
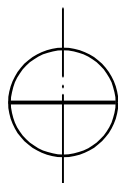


Рис. 3.26. Прокачиваемая бленда



Внутри прокачиваемых бленд имеется непрозрачная для лучей боковой помехи перегородка, а сами бленды установлены с возможностью вращения относительно оптической оси объектива. При работе прибора указанная перегородка автоматически располагается в плоскости, перпендикулярной плоскости, проходящей через точки «визируемая цель–ОЭП–центр боковой помехи».

Особенности борьбы с боковыми помехами в оптических системах земных ОЭП ИК-диапазона

Длины волн излучения, на которых работают земные ОЭП ИК-диапазона, в 20–30 раз больше длин волн света в видимом диапазоне спектра. Это приводит к тому, что эффект рассеяния оптического излучения на оптических элементах для земных ОЭП ИК-диапазона существенно меньше, чем для ОЭП видимого диапазона. Если рассматривать Солнце как абсолютно черное тело с температурой 6000 К, то плотность его излучения в спектральных диапазонах земных ОЭП ИК-диапазона на несколько порядков меньше по сравнению с ОЭП видимого диапазона. Все это приводит к тому, что в этих приборах бленда не нужна, а особенности борьбы с боковыми помехами (Солнцем) оптическими методами сводится к следующему. Как правило, оптическая система земного ОЭП ИК-диапазона содержит сканирующую систему и оптико-электронный блок с двумя концентрично расположенными каналами: узкопольным земным и более широкопольным солнечным, с помощью которого осуществляется регистрация наличия Солнца в его угловом поле. Сканирующая система в этих приборах в процессе работы (сканирования) может так перестроить траекторию сканирования по команде, формируемой солнечным каналом, что Солнце просто не попадает в угловое поле солнечного (а, следовательно, и земного) канала.

Наиболее типичными значениями диаметров угловых полей земного и солнечного каналов являются соответственно 3 и 4 угл. град, т.е. допустимый угол засветки краем Солнца равен 2°, а угловое положение края Солнца отстоит от края углового поля земного канала всего лишь на 30′.

Решение проблемы борьбы с Солнцем в рассматриваемых ИК-приборах покажем на следующем примере. Простейшая угловая траектория движения углового поля земного ОЭП ИК-диапазона с круговым сканированием, совмещенная с ИК-горизонтом Земли, представляет собой обычную окружность. При наличии Солнца на этой траектории (или непосредственно вблизи нее), а также при возможном виньетировании оптической системы элементами КА имеет место недопустимая потеря точности земного ОЭП. Для борьбы с указанными явлениями имеются различные приемы (в том числе и неоптические). Наиболее эффективным является оптический метод формирования дискретизированной траектории сканирования в виде отдельных неподвижных точек (рис. 3.27, б), реализуемый с помощью сканирующей системы, выполненной на основе двойного зеркала (рис. 3.27, а). Условия формирования такой траектории: ребро вращающегося двойного зеркала (типа БР-180°) должно быть расположено в плоскости, перпендикулярной оси вращения, которая совмещена с визирной линией оптико-электронного блока. Очевидно, что наличие больших азимутальных зазоров в траектории позволяет разместить земной ОЭП без виньетирования его элементами КА, а вероятность попадания Солнца в угловое поле земного ОЭП становится минимальной. Если все же Солнце попадает в угловое поле, то траектория сканирования поворотом периферийных зеркал будет перестроена вдоль ее радиальных направлений и угловое поле будет отведено от Солнца. Другими словами, те четыре точки, которые находились на горизонте Земли (штриховая окружность на рис. 3.27, б) будут отведены в космос, а другие четыре точки будут совмещены с горизонтом Земли (штриховой окружностью).

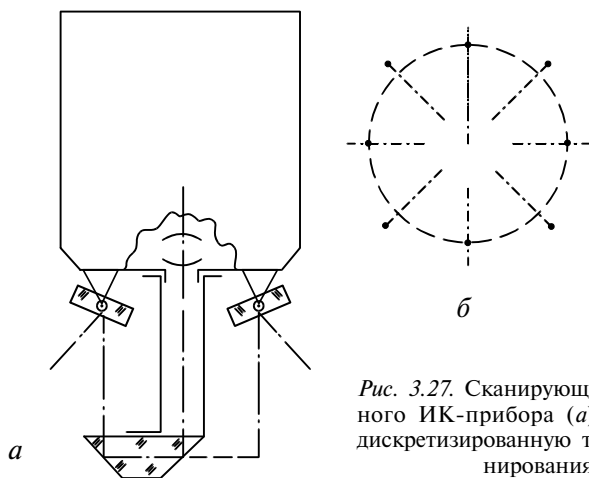


Рис. 3.27. Сканирующая система земного ИК-прибора (а), реализующая дискретизированную траекторию сканирования (б)

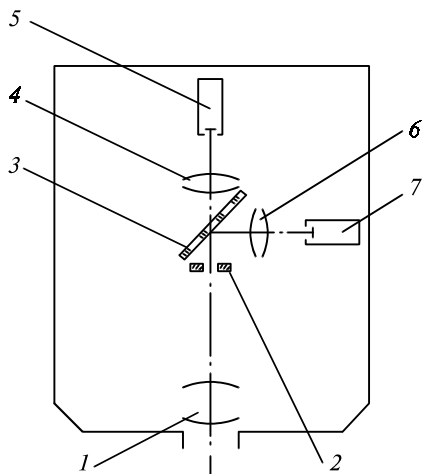


Рис. 3.28. Оптико-электронный блок с единой кольцевой диафрагмой: 1 — объектив; 2 — единая полевая кольцевая диафрагма; 3 — светоделиитель; 4 — конденсор; 5 — приемник излучения солнечного канала; 6 — конденсор; 7 — приемник излучения земного канала

Для регистрации наличия Солнца в угловом поле земного ОЭП (или вблизи его) в оптическую систему оптико-электронного блока вводится солнечный канал, который работает в ближней ИК-области, ограниченной длинами волн λ_1 – λ_2 . Земной канал работает в спектральной области λ_3 – λ_4 , причем $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3 < \lambda_4$. Основным недостатком традиционных указанных блоков с совмещенными земным и солнечным каналами является то, что в них может быть нарушен необходимый зазор между угловыми полями земного и солнечного каналов прибора. В оптико-электронном блоке земного ОЭП ИК-диапазона (рис. 3.28) указанный недостаток исключен за счет того, что полевая диафрагма 2, выполненная в виде кольца, расположена между объективом 1 и светоделиителем 3. Кольцевая зона в спектральной области работы солнечного канала (λ_1 – λ_2) прозрачна, а земного канала (λ_3 – λ_4) непрозрачна. Отверстие в кольце обеспечивает спектральное пропускание в области λ_1 – λ_4 . Практическая реализация данной диафрагмы представляет собой кольцо, выполненное из плавленого кварца, который прозрачен для λ_1 – λ_2 и непрозрачен для λ_3 – λ_4 . Типовые значения рассматриваемых длин волн: λ_1 – $\lambda_2 = 2$ –4,5 мкм, λ_3 – $\lambda_4 = 14$ –16 мкм. Светоделиитель также изготовлен из плавленого кварца.

3.2.2. Использование априорной информации в режиме поиска системы солнечно-звездной ориентации

Организация режима поиска ОЭП ориентации и навигации КА может предопределять весьма оригинальный выбор метода обеспечения повышенной помехозащищенности астроприбора. При ориентации КА большое распространение получил метод двухступенчатого поиска рабочей звезды [56] с использованием

априорной информации об угле «рабочая звезда–КА–вспомогательный ориентир».

Вспомогательным ориентиром может быть любое небесное тело, направление на которое известно и которое не лежит на прямой линии «рабочая звезда–КА». Наиболее просто в качестве такого ориентира использовать Солнце, причем угол «рабочая звезда–КА–вспомогательный ориентир (Солнце)» лежит в пределах $45\text{--}135^\circ$.

Рассмотрим процесс поиска рабочей звезды на примере системы солнечно-звездной ориентации (рис. 3.29, *а*). Положим, что осуществлена одноосная ориентация КА на Солнце (первая ступень поиска). КА придано вращение с постоянной скоростью относительно направления на Солнце. Звездный астроприбор жестко установлен на корпус КА так, что его оптическая ось составляет с осью вращения заданный угол «рабочая звезда–КА–Солнце». При таком положении угловое поле звездного прибора пересечет рабочую звезду не более чем за один оборот (вторая ступень поиска). Угол поля 2β в направлении, перпендикулярном движению звезды, составляет десятки угловых минут и определяется в основном отклонением оси вращения КА от направления на Солнце. Если в качестве приемника излучения звездного прибора используется диссектор 1, центр чувствительной площадки которого совмещен с фокусом F'_3 объектива 2, то для захвата изображения рабочей звезды необходимо обеспечить равномерное (с некоторой скоростью $v_{\text{ск}}$) сканирование электронной апертуры диссектора по строке поиска bb , проходящей через точку F'_3 перпендикулярно направлению движения звезды. Размер bb равен $2f' \operatorname{tg} \beta$, где f' — фокусное расстояние объектива звездного канала.

Для повышения помехозащищенности звездного прибора в его оптическую систему вводится канал вспомогательного ориентира (рис. 3.29, *б*), в котором излучение Солнца, отражаясь от зеркала уставок 3, попадает на цилиндрическую линзу 4, после чего, пройдя двойное зеркало 5, 6 и светоделительное зеркало 7, формируется в плоскости фотокатода в изображение Солнца (С), прямолинейные стороны которого перпендикулярны отрезку bb . Фокус (центр линии фокусов) цилиндрической линзы F'_c смещен относительно F'_3 по строке поиска bb на D , которая больше половины линейного размера изображения Солнца. При этом освещенность изображения Солнца должна быть соизмерима со средней освещенностью изображения рабочей звезды. Поэтому светоделительное зеркало выполняет также функцию сильного ослабляющего светофильтра, вследствие чего введение солнечно-го канала практически не уменьшает коэффициент пропускания звездного канала.

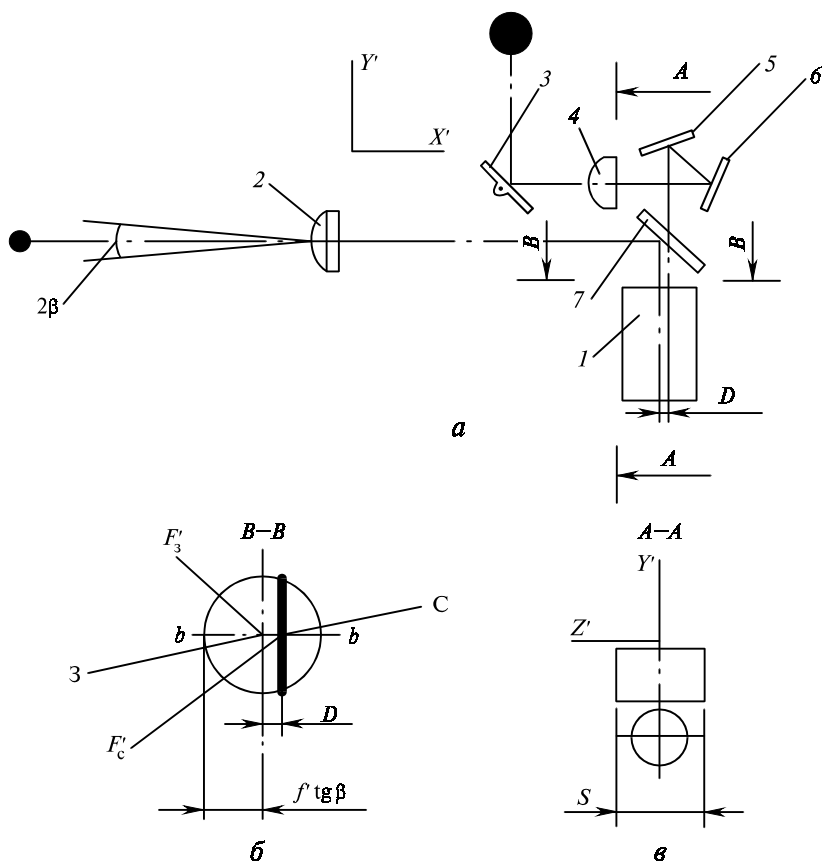


Рис. 3.29. Оптическая система астроприбора с каналом вспомогательного ориентира системы солнечно-звездной ориентации:

1 — диссектор; 2 — объектив; 3 — зеркало уставки; 4 — цилиндрическая линза; 5, 6 — двойное зеркало; 7 — светоделитель

Изменением наклона зеркала уставки 3 обеспечивается равенство угла между оптическими осями (в пространстве предметов) каналов углу «Солнце–КА–рабочая звезда». Система координат $X'Y'Z'$ (рис. 3.29) жестко связана с корпусом КА. Пусть оси X' и Y' соответственно параллельны оптическим осям звездного и солнечного каналов, а ось вращения КА совпадает с осью Y' и направлена на Солнце. В этом случае изображение Солнца неподвижно и его центр расположен в точке F'_c . В некоторый момент времени изображение рабочей звезды (3) будет находиться в строке поиска в точке F'_3 (рис. 3.29, б). Пусть в этот момент КА начинает прокатываться вокруг оси Z на угол $\pm\beta$. Крайние положения изображений в результате этого прокатывания показаны на рис. 3.30, а, б. Величина D осталась постоянной по двум причинам. Во-первых, фокусные расстояния объектива

и цилиндрической линзы равны, а это приводит к равным линейным перемещениям при равных углах смещения, во-вторых, благодаря использованию двойного зеркала 5, 6 (рис. 3.29, а) обораживание изображений звезды и Солнца согласованы, в результате оба изображения движутся в одну сторону.

Предположим, что изображение рабочей звезды продолжает находиться в точке F'_3 , а КА начинает прокатываться вокруг другой оси X' на этот же угол $\pm\beta$. Крайние положения изображений в результате этого прокатывания показаны на рис. 3.30, в, г. Величина D также осталась постоянной. Изображение рабочей звезды осталось в точке F'_3 , а изображение Солнца не сошло с линии bb , так как световой размер цилиндрической линзы вдоль прямолинейной образующей цилиндрической поверхности $S > 2f' \operatorname{tg} \beta$ (рис. 3.29, в, разрез А–А). Сохранение постоянства величины D позволяет считать изображение Солнца указателем места пересечения линии bb изображением рабочей звезды. В этом случае можно уменьшить строку поиска до величины Q (рис. 3.31), определяемой суммарной ошибкой звездного прибора с каналом вспомогательного ориентира. При этом необходимо, чтобы малая строка поиска Q постоянно отслеживала изображение Солнца, т.е. чтобы расстояние между центром малой строки поиска и серединой изображения Солнца на линии bb было постоянно и равно D , причем

$$D > 0,5 (Q + l),$$

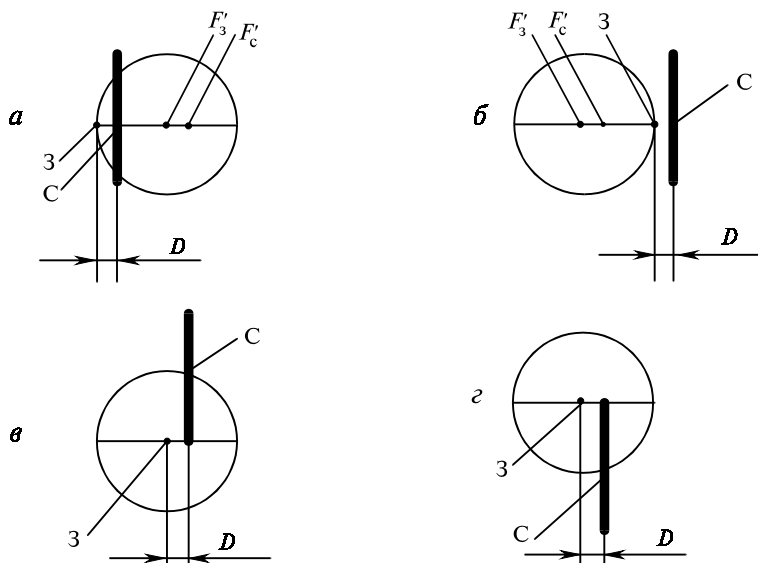


Рис. 3.30. Различные положения изображения звезды (3) и Солнца (C) при отклонении оси вращения КА от направления на центр Солнца (вспомогательный ориентир)

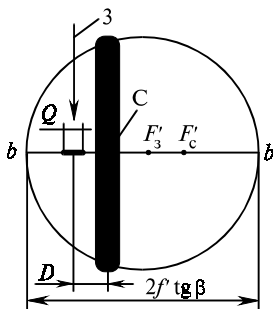


Рис. 3.31. Положение малой строки поиска Q относительно изображения Солнца

где l — ширина изображения Солнца. Все это будет гарантировать пересечение изображением рабочей звезды — малую строку поиска. Уменьшив скорость сканирования электронной апертуры диссектора в малой строке поиска до величины $v_{\text{ск}}^*$ в большой строке (bb), согласно выражению

$$v_{\text{ск}}^* = v_{\text{ск}} \frac{Q}{2f' \text{tg} \beta},$$

можно сузить соответственно эффективную шумовую полосу электронного тракта, что приведет к увеличению отношения сигнал/шум в k раз:

$$k = \frac{\mu^*}{\mu} = \sqrt{\frac{\Delta F}{\Delta F^*}} = \sqrt{\frac{v_{\text{ск}}}{v_{\text{ск}}^*}} = \sqrt{\frac{2f' \text{tg} \beta}{Q}}, \quad (3.2.6)$$

где μ^* , ΔF^* — соответственно отношение сигнал/шум и эффективная шумовая полоса при использовании солнечного канала; μ , ΔF — то же при отсутствии этого канала.

Размер малой строки поиска Q определяют в основном такие ошибки оптической системы, как погрешность выставки углового положения зеркала уставок, технологическое неравенство фокусных расстояний объективов звездного и солнечного каналов, различные значения дисторсий каналов, качество изображений каналов, конечный размер мгновенного углового поля электронной апертуры диссектора, а также «увод» изображения звезды относительно изображения Солнца по строке bb , из-за погрешностей ориентации на Солнце оси солнечного канала прибора при вращении КА. Последняя погрешность (обозначим ее ΔD_{max}) по существу определяет предельное (теоретическое) увеличение отношения сигнал/шум от введения в астроприбор канала вспомогательного астроориентира, так как все вышеперечисленные погрешности оптической системы можно существенно уменьшить. При создании звездного астроприбора с каналом вспомогательного ориентира была получена функциональная зависимость

$$\Delta D_{\text{max}} = f(\beta, \gamma),$$

где β — половина угла поля прибора в направлении, перпендикулярном движению изображения звезды, максимальное отклонение оси вращения КА от направления на центр Солнца; γ — угол «рабочая звезда–КА–вспомогательный ориентир (Солнце)».

Указанная зависимость в силу ее громоздкости здесь не приводится. На основании этой функциональной зависимости было установлено, что погрешность «увода» изображения звезды появляется в случае, когда угол γ между оптическими осями солнечного и звездного каналов не равен 90° (нарушение ортогональности) и при отклонении оси вращения КА от направления на центр Солнца в плоскости $Y'Z'$ в момент пересечения изображением звезды линии bb (рис. 3.29, б). Для указанного прибора, у которого $f' = 200$ мм, $\beta = 1,5^\circ$, $\gamma = 45^\circ$ ($\gamma = 135^\circ$), в предельном случае $\Delta D_{\max} = Q = 0,136$ мм. Из (3.26) следует, что теоретическое увеличение отношения сигнал/шум для данного прибора оценивается в 8,8 раза. Следует отметить также, что уменьшение строки поиска в этом приборе приводит к уменьшению вероятности захвата точечных помех (в частности, светящихся частиц).

3.2.3. Оптическая селекция светящихся частиц по размеру их изображения

В звездных ОЭП ориентации и навигации КА для борьбы с точечными помехами наибольшее распространение получили пороговые методы: селекция по скорости, амплитудная селекция и селекция по размеру изображения.

Из всей совокупности точечных световых помех практически только светящиеся частицы располагаются в непосредственной близости от КА. Поэтому для борьбы с частицами нашел применение дальнометрический метод селекции, основанный на анализе размера изображений частиц. Примем, что отражение от частиц диффузное, размеры их весьма малы ($5 \cdot 10^{-3}$ – $5 \cdot 10^{-2}$ мм). Тогда для зеркального (зеркально-линзового) центрированного объектива из простых геометрических построений получим, что дефокусированное изображение частицы в фокальной плоскости объектива является кольцо, внешний (Φ) и внутренний ($\Phi_{\text{в}}$) диаметр которого определяется как

$$\Phi \approx \Phi_{\text{к}} + \frac{Df'}{s}, \quad \Phi_{\text{в}} \approx \frac{df'}{s}, \quad d = \sqrt{D^2 - \frac{4S_{\text{вх.зр}}}{\pi}}, \quad (3.27)$$

где D и d — внешний и внутренний диаметры входного зрачка объектива; f' — фокусное расстояние объектива; $\Phi_{\text{к}}$ — диаметр кружка рассеяния объектива, который принимаем постоянным для всего углового поля; s — расстояние от частицы до КА ($s \gg f'$); $S_{\text{вх.зр}}$ — площадь входного зрачка объектива (виньетирование элементами креплений не учитываем).

При линзовом объективе кольцо обращается в круг, диаметр которого определяется выражением (3.27). При использовании метода селекции частиц по размеру их изображения все источники, размер изображений которых в плоскости анализа превышает некоторую пороговую величину Φ^* идентифицируется как помехи, а все прочие как звезды. Поэтому максимальное расстояние ($s_{\max}$) от КА, на котором обеспечивается селекция частиц рассматриваемым методом, определяется из (3.27):

$$s_{\max} \leq \frac{Df'}{\Phi^* - \Phi_k}.$$

Примером практической реализации этого метода может служить схема селекции в звездном приборе на диссекторе, электронная апертура которого $Q \approx 0,3$ мм, $f' = 200$ мм, $D = 71$ мм, $\Phi_k \approx 0,18$ мм. Схема селекции (по длительности импульса) обеспечивает $\Phi^* \approx 0,75$ мм, откуда $s_{\max} \leq 25$ м.

3.3. Особенности создания оптических систем широкопольных звездных приборов при обеспечении режимов измерения и поиска

Как правило, оптические системы современных звездных приборов, работающие с многоэлементными приемниками излучения, состоят из бленды, управляемой шторки, датчика наличия боковых помех, канала геометрического эталона, объектива и ПЗС. В данном разделе для простоты изложения ограничимся рассмотрением оптической системы широкопольного звездного прибора, содержащего только бленду, объектив и ПЗС [76].

При создании такого прибора необходимо в его оптической системе комплексно реализовать оптические методы, обеспечивающие разные режимы его работы. Режим измерения предопределяет специфические требования к качеству его объектива. Требование получения равномерной освещенности на матрице ПЗС в режимах поиска и измерения приводит к установке дополнительной диафрагмы перед ПЗС и к особому положению кромок диафрагм в бленде. Стремление к минимизации габаритно-массовых характеристик прибора формирует требование о выносе вперед входного зрачка объектива. В последующих разделах представлены эти особенности создания оптических систем широкопольных звездных приборов.

3.3.1. Критерии качества объективов широкопольных звездных приборов

Изображение звезды (точки) на матрице ПЗС наилучшим образом описывается двумерной функцией распределения освещенности (ФРТ). Так как при расчете объектива (при его опти-

мизации) пользоваться ФРТ неудобно, то было предложено несколько одночисловых критериев ее оценки. Нами используется следующий эмпирический критерий [76]. Задается один размер ФРТ, определяемый (измеряемый) по уровню 10% от максимальной освещенности в ФРТ вдоль меридионального и сагиттально-го направлений на матрице ПЗС. Этот размер принимается с допуском, что исключает существенное нарушение равенства ФРТ вдоль указанных направлений. Иными словами, протяженность ФРТ по уровню $0,1E_{\max}$ должна быть $(A \pm \Delta A) \times (A \pm \Delta A)$. Однако выполнение этого критерия еще не гарантирует оптимального сочетания проектируемого объектива с заданным ПЗС.

Традиционно в прикладной оптике дисторсию объектива описывают разностью между координатой $Y'_{\text{гл}}$ главного луча (действительного луча, проходящего через центр зрачка) и координатой нулевого луча Y'_0 , соответствующей идеальному изображению:

$$\Delta Y'_d = Y'_{\text{гл}} - Y'_0.$$

Назовем эту дисторсию геометрической. Однако функционально звездные приборы определяют координаты энергетического центра изображения звезды на матрице ПЗС по алгоритму, который (в общем виде) может быть записан следующим образом:

$$X_0^{\wedge} = \frac{\sum_i \sum_j X_{ij} U_{ij}}{\sum_i \sum_j U_{ij}}, \quad Y_0^{\wedge} = \frac{\sum_i \sum_j Y_{ij} U_{ij}}{\sum_i \sum_j U_{ij}}, \quad (3.28)$$

где U_{ij} — сигнал от изображения с ij -го элемента матрицы ПЗС, превышающий порог селекции сигналов $U_{\text{п}}$; X_{ij} , Y_{ij} — координата ij -го элемента в системе координат матрицы. Суммирование ведется по всем элементам матрицы ПЗС, с которых сигнал от изображения превышает порог селекции $U_{\text{п}}$.

Погрешности определения координат $X_0^{\wedge}$, $Y_0^{\wedge}$ относительно положения главного луча на матрице ПЗС определяются как

$$\begin{aligned} \Delta X &= X_0^{\wedge} - X'_{\text{гл}}, \\ \Delta Y &= Y_0^{\wedge} - Y'_{\text{гл}}, \end{aligned}$$

Отсюда суммарные погрешности $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ определения угловых координат α , β звезды можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta\alpha &= \Delta X'_d + \Delta X; \\ \Delta\beta &= \Delta Y'_d + \Delta Y; \end{aligned}$$

Геометрическая дисторсия $\Delta X'_d$, $\Delta Y'_d$ на $\Delta\alpha$, $\Delta\beta$ имеет систематический характер. Погрешности ΔX , ΔY можно представить в виде систематической составляющей, которую обозначим через

ΔX^* , ΔY^* (в дальнейшем будем называть энергетической дисторсией), и случайной составляющей, которую будем характеризовать значениями СКО $\sigma\Delta_X$, $\sigma\Delta_Y$.

Геометрическая дисторсия и ФРТ объектива рассчитываются по известным универсальным программам расчета и оптимизации оптических систем, например OPTIC, ZEMAX. Энергетическая дисторсия и СКО $3\sigma\Delta_X$, $3\sigma\Delta_Y$ объектива рассчитываются с использованием комплекта специализированных программ, основанных на методах математического моделирования. В этих программах заложены параметры ПЗС, электронного тракта прибора, звездная величина, яркость фона, их спектральные характеристики и др. Геометрическая дисторсия и ФРТ являются исходными данными для проведения расчета.

Суммарное влияние систематической погрешности из-за геометрической и энергетической дисторсии ($\Delta Y'_d + \Delta Y^*$) на точность измерений координат может быть значительно уменьшена. Для этого указанная систематическая погрешность описывается аппроксимирующей функцией, параметры которой используются в алгоритме определения координат звезд. В этом случае оценка объектива производится по отклонению ($\Delta Y'_d + \Delta Y^*$) от аппроксимирующей функции. Другими словами, производится оценка погрешностей аппроксимации систематических погрешностей.

3.3.2. Методика расчета объективов широкопольных звездных приборов

Для оценки достижения совокупности величин оптических характеристик рассматриваемых объективов воспользуемся свойством инвариантности указанных характеристик фотографических объективов, которые описываются следующим выражением [10]:

$$\frac{\operatorname{tg} \omega \sqrt{f'/100}}{N} = C_{\max}, \quad (3.29)$$

где ω — половина диагонали углового поля; f' — фокусное расстояние; N — относительное отверстие; $C_{\max}$ является постоянной для большой группы фотографических объективов (чем больше $C_{\max}$ конкретного объектива, тем он считается лучше).

Для объективов звездных приборов с ПЗС характерны следующие отличия от фотографических объективов. Эти объективы работают в более широком спектральном диапазоне от 0,4 до 1,1 мкм. Из-за условий эксплуатации в них, как правило, используются радиационностойкие стекла, количество марок которого существенно меньше, чем обычных оптических материалов. Виньетирование излучения звезд в этих объективах не допускается. Специфичность критериев качества рассматриваемых объективов изложена в разд. 3.3.1. Современные программы расчета и опти-

мизации оптических систем при проведении оптимизации объективов на ЭВМ воздействуют, как правило, на аберрации отдельных лучей. Возможность непосредственного получения необходимой формы ФРТ в них не предусмотрена. Поскольку объектив и бленда работают совместно, желательно иметь расположение входного зрачка перед первой поверхностью объектива (для уменьшения габаритных параметров бленды). Эти отличия (требования) существенно усложняют расчет объективов звездных приборов по сравнению с фотографическими объективами.

Методику расчетов объективов широкопольных звездных приборов с ПЗС проиллюстрируем на примере объектива со следующими заданными параметрами: $2\omega = 37^\circ$, $f = 16,5$ мм, $1:N = 1:1,5$, $(A \pm \Delta A) \times (A \pm \Delta A) = (0,045 \pm 0,015) \times (0,045 \pm 0,015)$ мм по уровню $0,1E_{\max}$ ФРТ, максимальное значение геометрической дисторсии не более 0,3 мм [76].

Объектив должен иметь минимальные значения как систематических, так и случайных составляющих погрешностей определения координат изображения звезд на выбранной матрице ПЗС. В качестве аппроксимирующей функции допускается использовать полином не выше третьей степени.

Совокупность параметров 2ω , f , $1:N$ в соответствии с (3.29) дает $C_{\max} = 0,091$. Анализ звездных приборов на ПЗС на момент расчета этого объектива [76] показал, что ни один из известных нам объективов указанных приборов не обеспечивает реализацию $C_{\max}$ больше 0,091.

В начале расчета был выбран известный шестилинзовый анастигмат типа «планар» [10]. Так как с помощью данного варианта не удалось реализовать заданные параметры, то в дальнейшем, проводя последовательное усложнение конструкции, были рассчитаны еще несколько вариантов. Только восьмилинзовый объектив (рис. 3.32) позволил приблизиться к заданным требованиям. Затем на его основе были рассчитаны три варианта, которые удовлетворяют заданным оптическим критериям. Результаты расчетов приведены в табл. 3.5.

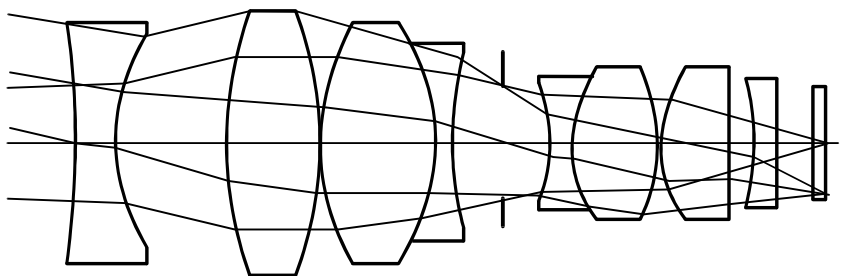


Рис. 3.32. Широкопольный объектив звездного прибора
($2\omega = 37^\circ$, $f = 16,5$ мм, $1:N = 1:1,5$)

Таблица 3.5

Результаты расчетов трех вариантов объектива
 $(\lambda_0 = 0,65 \text{ мкм}, k_0 = 1,0; \lambda_1 = 0,45 \text{ мкм}, k_1 = 0,35;$
 $\lambda_2 = 0,9 \text{ мкм}, k_2 = 0,35; \text{число линз } 8)$

Номер варианта	ФРТ на уровне 10%, мм			Геометрическая дисторсия
	$\omega = 0^\circ$	$\omega = 10^\circ 30'$	$\omega = 18^\circ 30'$	
1	0,03	0,03×0,03	0,045×0,04	0,126
2	0,05	0,055×0,05	0,06×0,05	0,16
3	0,04	0,045×0,04	0,04×0,05	0,25

Таблица 3.6

Расчетные значения геометрической $\Delta Y'_d$ и энергетической ΔY^* дисторсии
трех вариантов объектива

Угол поля ω	Вариант 1			Вариант 2			Вариант 3		
	$\Delta Y'_d$	ΔY^*	$\Delta Y'_d + \Delta Y^*$	$\Delta Y'_d$	ΔY^*	$\Delta Y'_d + \Delta Y^*$	$\Delta Y'_d$	ΔY^*	$\Delta Y'_d + \Delta Y^*$
10°30'	4',55	0',09	4',64	5',83	-0',96	4',86	8',95	0',12	9',07
18°30'	23',55	0',74	24',26	30',62	-1',21	29',42	47',13	0',42	47',55

Таблица 3.7

Расчетные значения погрешности δY_d аппроксимации
геометрической дисторсии зависимостью $a\omega^3$

Угол поля ω	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
3°42'	-0'',3	-0'',7	-1'',3
7°24'	-2'',1	-4'',9	-8'',4
11°06'	-4'',9	-11'',9	-20'',8
14°48'	-5'',0	-13'',4	-23'',9
18°30'	-3'',7	-9'',8	-17'',3

Расчет систематических погрешностей (табл. 3.6), показал, что эти погрешности составляют более 20', а вклад энергетической дисторсии ΔY^* в суммарную погрешность здесь не превышает 2–5%. Поэтому аппроксимировалась только геометрическая дисторсия. В табл. 3.7 приведены расчетные значения погрешностей δY_d аппроксимации $\Delta Y'_d$ функцией вида $a\omega^3$, дающей наиболее приемлемую для практики точность аппроксимации (не хуже 25'') из всех рассмотренных полиномов.

Из трех рассмотренных вариантов объектива наиболее предпочтительным представляется вариант 1, для которого абсолютные значения погрешностей аппроксимации δY_d являются наименьшими.

Расчетные оценки максимальных значений случайной составляющей погрешности $3\sigma\Delta_x$, $3\sigma\Delta_y$, полученные для звезды $m_V = 4^m$ спектрального класса G2-V при яркости внешнего фона $0,01$ кд/м² представлены в табл. 3.8 для трех вариантов объективов. Как следует из табл. 3.8, наименьшие значения случайных погрешностей измерений также соответствуют варианту 1.

Таблица 3.8

Расчетные оценки суммарных случайных погрешностей измерений координат изображения на матрице ПЗС ($m = 4^m$, $B_\Phi = 0,01$ кд/м²)

Угол поля ω	Параметр	Вариант объектива		
		1	2	3
10°30'	$3\sigma\Delta_x$	17'',5	51'',9	36'',9
	$3\sigma\Delta_y$	12'',6	26'',9	117'',8
18°30'	$3\sigma\Delta_x$	23'',8	50'',8	30'',9
	$3\sigma\Delta_y$	34'',7	79'',1	110'',1

Таким образом, на основании изложенного выше сравнительного анализа следует, что из трех вариантов объективов равноценным по оптическим критериям качества вариант 1 является наилучшим и принимается для проведения дальнейших расчетов.

На последнем этапе расчета объектива (после определения окончательного вида аппроксимирующей функции) и конструкции его оправ и корпуса была сделана оценка суммарной погрешности определения угловых координат изображений звезд на выбранной матрице ПЗС звездного прибора с учетом следующих условий. Звездная величина $m_V = 4^m$, яркость равномерного внешнего фона $0,01$ кд/м², диапазон температур от -20 до $+60^\circ\text{C}$, диапазон цветовых температур излучения звезд от 2600 до $25\,000$ К.

3.3.3. Проектирование бленд широкопольных звездных приборов

Параметры объективов широкопольных звездных приборов на ПЗС определяют и особенности проектирования их бленд. Известно, что габаритные параметры бленды (рис. 3.33) определяются следующими выражениями [71]:

$$L = \frac{2R_6}{\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \omega_6}, \quad D = 2k(R_6 + L \operatorname{tg} \omega_6), \quad (3.30)$$

где L — длина бленды; D — наибольший диаметр бленды; R_6 — радиус выходного окна бленды; ω_6 — угол между лучом, на котором располагаются кромки диафрагм бленды, и оптической

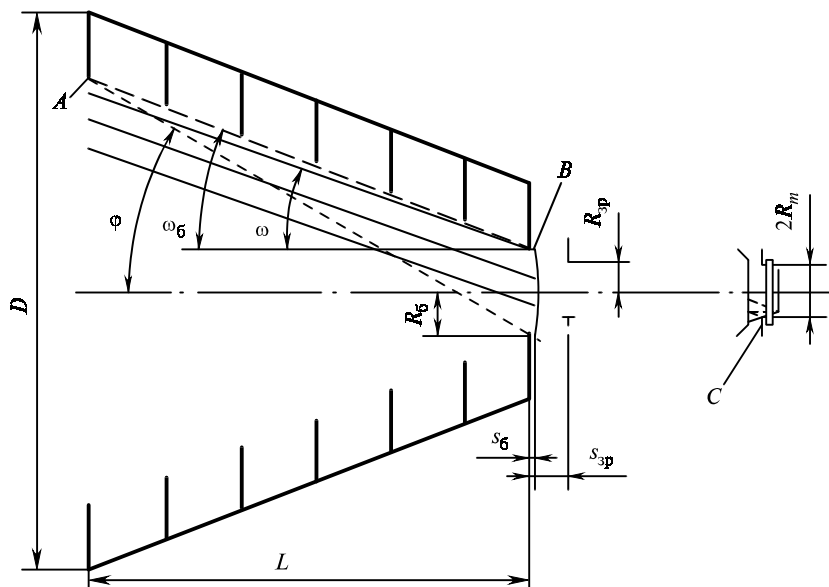


Рис. 3.33. Оптическая система широкопольного звездного прибора с ПЗС ($f = 16,5$ мм, $1 : N = 1 : 1,5$, $\omega = 18,5^\circ$, $\omega_g = 21,167^\circ$, $L = 128,3$ мм, $D = 160,9$ мм)

осью объектива; k — коэффициент, определяемый выбранной глубиной карманов бленды ($k > 1$); ϕ — угол засветки бленды.

Длина бленд узкопольных звездных приборов соизмерима или меньше фокусного расстояния объектива. Для них, как правило, выполняются следующие соотношения:

$$R_g = R_{зр}, \quad \omega_g = \omega, \quad (3.31)$$

где $R_{зр}$ — радиус входного зрачка объектива; ω — половина его углового поля.

Однако для выполнения условия (3.31) для широкопольных звездных приборов, у которых длина бленды в несколько раз превышает фокусное расстояние объектива, приводит к тому, что освещенная Солнцем кромка первой диафрагмы бленды (точка A) фокусируется объективом вблизи матрицы ПЗС, а ее изображение на матрице непосредственно примыкает к границе линейного поля объектива. В результате многократных отражений от этого изображения внутри полости ПЗС, как показывает практика, создается недопустимый (особенно для режима поиска) градиент освещенности на краю поля объектива и тем самым не обеспечивается помехозащищенность прибора [73, 76].

Поэтому непосредственно перед первой поверхностью защитного стекла ПЗС устанавливается диафрагма (рис. 3.33), диаметр которой $2R_{\max}$ равен диаметру данного сечения световой

трубки объектива. Другими словами, эта диафрагма имеет минимальный диаметр, но не виньетировует излучения звезд в угловом поле 2ω . Угол ω_6 в данном случае определяется лучом, проходящим через край оправы на первой поверхности первой линзы (точка B) и край диафрагмы перед ПЗС (точка C), а величина R_6 определяется выражением

$$R_6 = R_{\text{зп}} + s_{\text{зп}} \operatorname{tg} \omega + s_6 \operatorname{tg} \omega_6, \quad (3.32)$$

где $s_{\text{зп}}$ — расстояние от первой поверхности объектива до его входного зрачка; s_6 — расстояние от первой поверхности объектива до выходного окна бленды.

Рассмотрим пример проектирования оптической схемы с блендой, у которой $\varphi = 30^\circ$, $k = 1,3$, с рассмотренным выше объективом, у которого $R_{\text{зп}} = 5,5$ мм, $s_{\text{зп}} = 17,6$ мм, $s_6 = 2,0$ мм, и с ПЗС, у которого толщина защитного стекла 1,0 мм, расстояние от защитного стекла до матрицы 0,5 мм и диаметр диафрагмы перед защитным стеклом $2R_{\text{max}} = 11,0$ мм.

После проведения расчетов лучей было получено $\omega_6 = 21,167^\circ$, а из формул (3.30), (3.32) $L = 128,3$ мм, $D = 160,9$ мм.

Если теперь предположить, что возможно создать широкопольный объектив с вынесенным вперед входным зрачком, а ширина кромок диафрагм бленды и их коэффициент отражения бесконечно малы, т.е. выполняется условие (3.31), то в этом случае габаритные параметры бленды уменьшаются до $L = 45,3$ мм, $D = 53,7$ мм.

Таким образом, при создании рассматриваемых широкопольных звездных приборов необходимо учитывать специфические особенности проектирования их объективов и бленд. Для обеспечения помехозащищенности прибора при расчете его бленды угол при вершине конуса, на котором располагаются кромки ее диафрагм, должен быть значительно больше углового поля объектива, что приводит к увеличению габаритных параметров бленды. Для повышения точности измерений прибора при расчете его объектива необходимо привлекать рассмотренные выше критерии качества.

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ОЭП ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ КА

В настоящей главе описаны конструкции и функционирование основных типов астроприборов, созданных на протяжении всей истории их развития — от первых с весьма ограниченным набором функций до современных высокоинтеллектуальных. Такой ретроспективный подход позволяет продемонстрировать, как реализуются изложенные выше принципы проектирования в реальных конструкциях при различной степени развитости используемой электронной элементной базы. Большинство из описываемых приборов созданы в НПП «Геофизика-Космос», их описания и характеристики приведены в [45].

4.1. Звездные ОЭП ориентации и навигации КА

4.1.1. Звездный прибор солнечно-звездной системы ориентации для межпланетных полетов

Прибор предназначен для работы в солнечно-звездной системе ориентации при межпланетных полетах. Это один из первых отечественных звездных приборов, созданных в 1960-е — начале 1970-х годов. Главными техническими требованиями, определившими его технический облик, являются высокая угловая точность, простота и надежность конструкции, обеспечившие непрерывную работу в течение многомесячных межпланетных перелетов. Прибор работает в следующих режимах:

- поиска звезды с автоматической подстройкой чувствительности и запоминанием измененного ее блеска;
- точной ориентации на звезду;
- ориентации средней точности на звезду;
- постоянной звездной ориентации (ПЗВО) в дежурном режиме.

Прибор выполняет измерение угловой координаты звезды в приборной системе координат, связанной с его базовыми поверхностями (рис. 4.1, *а*). На этом рисунке $OXYZ$ — прямоугольная базовая система координат прибора; OP — ось визирования прибора, радиус-вектор системы координат, реализуемой механизмом уставок; B — подвижное относительно базы прибора угловое поле; PON — диаметрально отсчетная плоскость углового поля; ρ — угол между визирной осью OP и осью X ; q — угол между проекцией визирной оси OP на плоскость ZOY и осью Y

(отсчитывается против часовой стрелки от оси минус Y при наблюдении с отрицательного конца оси X). В угловом поле этого прибора в плоскости изображения оптической системы (рис. 4.1, б). Y' — координатная ось отсчетной системы прибора, совпадающая (с точностью до погрешности измерений прибора) с осью Y , γ условно обозначена величина, характеризующая угол отклонения направления на звезду от отсчетной плоскости PON ; ниже под γ понимается сам этот угол.

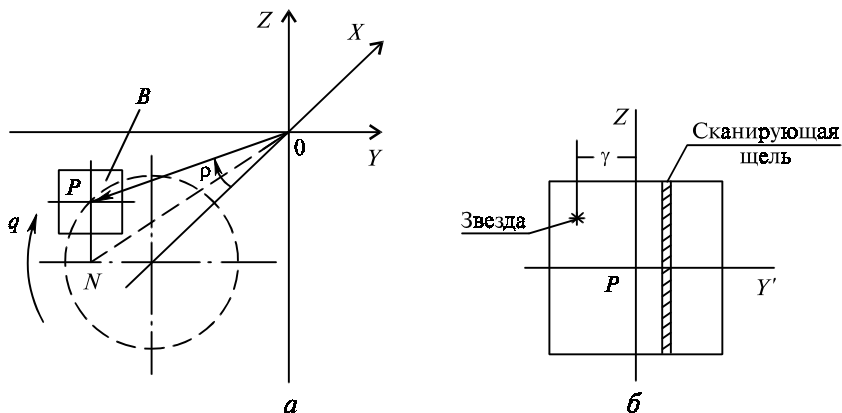


Рис. 4.1. Система координат звездного прибора солнечно-звездной системы ориентации (а) и его угловое поле (б)

Основные параметры и характеристики прибора:

- угловое поле $6 \times 6^\circ$;
- мгновенное угловое поле $2' \times 6^\circ$ (дуга со стрелкой прогиба $6'$);
- диапазон углов уставки оси визирования по углу ρ от 0 до 25° , по углу q от 0 до 450° ;
- рабочие звезды Сириус, Канопус, Вега, Капелла;
- допустимая яркость мешающего равномерного фона $0,1 \text{ кд/м}^2$;
- управляющие сигналы зависят от угла отклонения звезды от отсчетной плоскости γ : в режиме точной ориентации в диапазоне углов $\gamma = \pm 10'$ эта зависимость линейная, далее сигналы постоянные, в режиме средней точности в диапазоне углов $\gamma = \pm 10'$ зона нечувствительности, далее до $\gamma = 25'$ зависимость линейная, при больших γ сигналы постоянные; в режиме постоянной звездной ориентации при достижении углом γ определенных пороговых значений, формируются импульсы первого рода только при увеличении угла γ , второго рода как при увеличении, так и при уменьшении угла γ . Импульсы первого рода формируются в диапазоне углов γ от 52 до $91'$ с шагом по углу $3-8'$, импульсы второго рода — в диапазоне

- углов γ от 91 до $175'$ с шагом $1-15'$ (различные модификации прибора имели импульсные сигналы с разными угловыми порогами);
- предельная погрешность определения направления на звезду в приборной системе координат в зоне $\pm 30'$ от отсчетной плоскости в режиме точной ориентации $1'$ при $q = 90^\circ$ и $\rho < 18^\circ$, $3'$ при $q \approx 90^\circ$ и $\rho < 18^\circ$, $5'$ при прочих углах ρ ; в режимах средней точности и ПЗВО $7'$ при $\rho < 18^\circ$ и $10'$ при $\rho > 18^\circ$;
 - допустимый угол между осью визирования прибора и направлением на помеховые источники: Солнце — 60° , край планет Марс, Венера, освещенный Солнцем, — 20° или 14° в зависимости от применяемой защитной бленды.

Прибор выполнен в виде единого герметичного блока, масса которого $(15,3 \pm 0,3)$ кг; дополнительно может комплектоваться логическим блоком стробирования, повышающим помехозащищенность прибора к световым помехам типа «светящихся частиц» и/или подобным. Масса блока стробирования $(1,1 \pm 0,1)$ кг. Электропитание прибора осуществляется от источника постоянного тока напряжением от 23 до 34 В, потребляемая мощность от 13 до $18,5$ Вт в зависимости от режима работы.

Угловое поле, угловое положение которого в системе координат прибора можно изменять с помощью механизма уставок по внешним командам, формируется оптической системой прибора, которая содержит звездный канал (основной), канал эталона (рис. 4.2), канал имитатора и канал защиты от засветок.

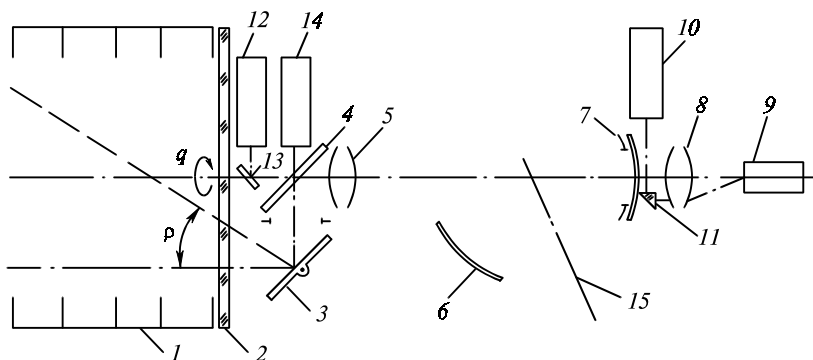


Рис. 4.2. Оптическая система звездного прибора солнечно-звездной системы ориентации:

1 — бленда; 2 — защитное стекло; 3, 13 — плоское зеркало; 4 — плоское зеркало с отверстием; 5 — объектив; 6 — сферический модулятор; 7 — полевая диафрагма; 8 — конденсор; 9 — ФЭУ; 10 — блок канала эталона; 11 — элемент ввода канала эталона; 12 — блок канала имитатора звезды; 14 — блок канала защиты; 15 — ось вращения модулятора и элемента 11

Основной (звездный) канал состоит из бленды 1, защитного (герметизирующего) окна 2, плоских зеркал 3, 4, объектива 5, полевой диафрагмы 7, модулятора 6, конденсора 8 и фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) 9. Излучение от звезды последовательно проходит элементы 1–9. Поворотом зеркала 3 реализуется угол уставок ρ . При совместном повороте зеркал 3, 4 вокруг оптической оси объектива визирная линия прибора поворачивается на угол q .

Объектив 5 представляет собой двухлинзовую склеенную конструкцию, которая обладает неустранимой аберрацией — кривизной поля. Поэтому модулятор 6 выполнен в виде сферической чашки, кривизна которой совпадает с кривизной поля объектива 5. На модулятор нанесена прозрачная щель в виде спирали Архимеда. Модулятор вращается вокруг оси 15. По сравнению с плоским диском Нипкова эта конструкция позволяет существенно сократить габаритные размеры прибора. Следует отметить, что в этом модуляторе конфигурация прозрачных зон такова, что при работе прибора на равномерном световом фоне модуляции электрического сигнала не происходит. Объектив 5 фокусирует изображение звезды на поверхности модулятора 6. Конденсор 8 формирует выходной зрачок канала на чувствительной площадке ФЭУ 9.

Канал эталона состоит из элементов 10, 11, 8, 9. Блок 10 неподвижный. Изображение радиoluminesцентного излучателя (РЛИ), установленного в блоке 10, формируется с помощью элемента 11, который жестко соединен с модулятором 6. После элемента 11 излучение РЛИ с помощью конденсора 8 попадает на ФЭУ 9. Стабильное излучение РЛИ используется в качестве опорного при автоподстройке чувствительности фотоэлектронного тракта. При совместном повороте зеркал 3, 4 вокруг оси объектива при $\rho \neq 0^\circ$ и $q \neq 0^\circ$ (90° , 180° , 270°) происходит небольшой разворот изображения углового поля (в пространстве предметов), который приводит к некоторой систематической погрешности, входящей в общую погрешность прибора.

Канал имитатора звезды 12 представляет собой коллиматор, точечное изображение которого заводится в основной канал с помощью зеркала 13 и прозрачного отверстия в зеркале 4.

В канале защиты 14 прозрачное отверстие в зеркале 4 оптически сопрягается с фоторезистором. При вхождении в угловое поле края планеты или фона недопустимой яркости эта специальная трубка защиты формирует сигнал засветки, по которому снимается высоковольтное питание с ФЭУ.

Канал имитатора звезды 12 и канал защиты 14 жестко соединены с системой зеркал 3, 4.

Для расширения возможностей прибора в нештатных ситуациях в приборе имеется система автоподстройки чувствительности (АПЧ), обеспечивающая возможность настройки чувствительности либо по опорному источнику излучения, либо по наиболее яркой звезде в зоне поиска с запоминанием блеска этой звезды (в том числе и при выключенном приборе). Высокочастотная шумовая составляющая сигнала ФЭУ детектируется и используется для регистрации телеметрической системой с целью контроля яркости фона.

В приборе реализован ряд оригинальных технических решений, позволивших создать весьма компактную и надежную конструкцию. Как отмечалось выше, модулирующая шторка прибора выполнена в виде сферического сегмента с нанесенной на него спиральной щелью, которая при вращении модулятора «просматривает» угловое поле в направлении оси Y' . Часть элементов прибора конструктивно расположена внутри этой сферы, что существенно сокращает габаритные параметры оптической системы.

Формирование линейных управляющих сигналов производится с помощью электромагнитных элементов — магнитных головок. Построение подобной схемы на полупроводниковых приборах элементной базы конца 1960-х годов потребовало бы большого количества электрорадиоэлементов и не позволило бы обеспечить высокую надежность.

С целью повышения помехозащищенности прибора в последней его модификации был введен блок стробирования, с помощью которого после обнаружения звезды формировался строб, разрешающий прохождение сигнала с приемника только в малой угловой зоне около звезды. Тем самым были разделены режимы поиска и слежения по способам обработки сигнала, что демонстрирует реализацию принципа разделения режимов.

В различных модификациях приборы подобного типа использовались на межпланетных станциях «Венера» с 1971 по 1986 г.

4.1.2. Помехозащищенный звездный прибор солнечно-звездной системы ориентации

Первые звездные приборы систем солнечно-звездной ориентации, не рассчитанные на работу при воздействии значительных световых помех, не обеспечивали в ряде случаев надежную работу системы ориентации или же накладывали существенные ограничения на условия работы КА. В связи с этим перед разработчиками звездных ОЭП в конце 1960-х годов была поставлена задача создания звездного прибора солнечно-звездной системы ориентации, работающего в условиях повышенных световых

помех. Существенного повышения помехозащищенности можно было достичь, максимально используя в приборе всю имеющуюся информацию, как априорную, так и ту, которая поступает в процессе работы. Поэтому в основу построения прибора был положен принцип электронного сканирования, который позволяет реализовать достаточно сложные процедуры обзора пространства и оперативно изменять их в зависимости от поступающей информации. В качестве фотоприемника в приборах был использован диссектор, перспективный для того времени приемник при решении сложных задач в автоматических оптико-электронных системах.

При создании этого прибора были разработаны методы обработки информации во всех основных режимах работы звездного прибора — в режимах поиска и обнаружения, селекции, слежения, калибровки, впоследствии описанные в [46, 47, 58]. Разработаны также способы реализации этих методов применительно к диссекторным системам и конкретные схемы. Сегодня эти конкретные способы и схемы представляют в основном исторический интерес, но принципы, на базе которых они созданы, реализованы в серии последующих разработок; они актуальны и сегодня и продолжают использоваться в современных звездных приборах. Поэтому при описании данного прибора достаточно подробно излагаются способы обработки сигналов, как оптических, так и электрических (способы пространственно-временной обработки).

Прибор, состоящий из оптического и электронного блоков, предназначен для обнаружения рабочей звезды и формирования управляющих сигналов, пропорциональных проекциям на две взаимно перпендикулярные плоскости угла между линией визирования прибора и направлением на звезду при работе в солнечно-звездной системе ориентации КА, в которой поиск звезды ведется вращением КА вокруг оси, направленной на Солнце.

Основные характеристики прибора:

- рабочие звезды Сириус, Канопус, Вега, Ригель;
- предельная яркость фона для рабочей звезды Сириус — 75 кд/м^2 , Канопус — 30 кд/м^2 , Вега, Ригель — 10 кд/м^2 ;
- скорость перемещения звезды в угловом поле до $0,5 \text{ град/с}$;
- угловое поле $4,5 \times 3^\circ$;
- предельная погрешность определения угла рассогласования между осью визирования прибора и направлением на звезду в линейной зоне управляющих сигналов $30 \times 30'$ не более $3'$;
- угловое поле вспомогательного солнечного канала, служащего для повышения помехозащищенности при работе по звездам $3 \times 3^\circ$, диапазон углов уставок (углов Солнце–объект–звезда) от 40 до 140° ;

- потребляемая мощность не более 40 Вт от источника постоянного тока напряжением 27^{+7}_{-4} В;
- срок службы — 500 ч;
- масса прибора не более 14,5 кг, в том числе масса оптического блока не более 10 кг, электронного блока — не более 4,5 кг.

При поиске звезды в солнечно-звездной системе ориентации КА вращается вокруг оси, направленной на Солнце, с некоторой фиксированной скоростью. Поэтому звезда входит в угловое поле звездного прибора с заранее известного направления и с заранее известной скоростью. Использование этой информации позволяет вести поиск звезды не по всему угловому полю, а только у той его границы, с которой ожидается вхождение звезды. В результате поле поиска существенно сужается, что и позволяет повысить помехозащищенность.

Размер углового поля в направлении, перпендикулярном направлению движения звезды, определяется погрешностью ориентации оси вращения КА на Солнце и погрешностью установки звездного прибора относительно оси КА. Последняя погрешность может быть весьма значительной ввиду деформаций конструкции КА в полете. Поэтому размер углового поля в указанном выше направлении составляет 3° .

Для уменьшения зоны поиска с целью повышения помехозащищенности прибора используется также информация об известном угле между звездой и Солнцем. Поскольку в процессе поиска одна из осей прибора направлена на Солнце, то его изображение, заведенное в фокальную плоскость объектива звездного канала, может служить опорной меткой для формирования на фиксированном расстоянии от нее зоны поиска малого размера. В результате поле (строка) поиска может быть сокращено еще в несколько раз и соответственно увеличена помехозащищенность.

Функциональная схема прибора представлена на рис. 4.3. В оптический блок входят:

- оптическая система, состоящая из трех оптических каналов (канал звезды с линзовым объективом, канал Солнца с цилиндрической оптикой и зеркалом уставок, канал опорных меток); объектив канала звезды имеет диаметр входного зрачка 72 мм, фокусное расстояние 200 мм;
- диссектор с фокусирующей отклоняющей системой (ФОС);
- предусилитель видеосигнала;
- блок усилителей разверток;
- узлы управления лампами опорных меток и затвором;
- датчик засветки;
- затвор.

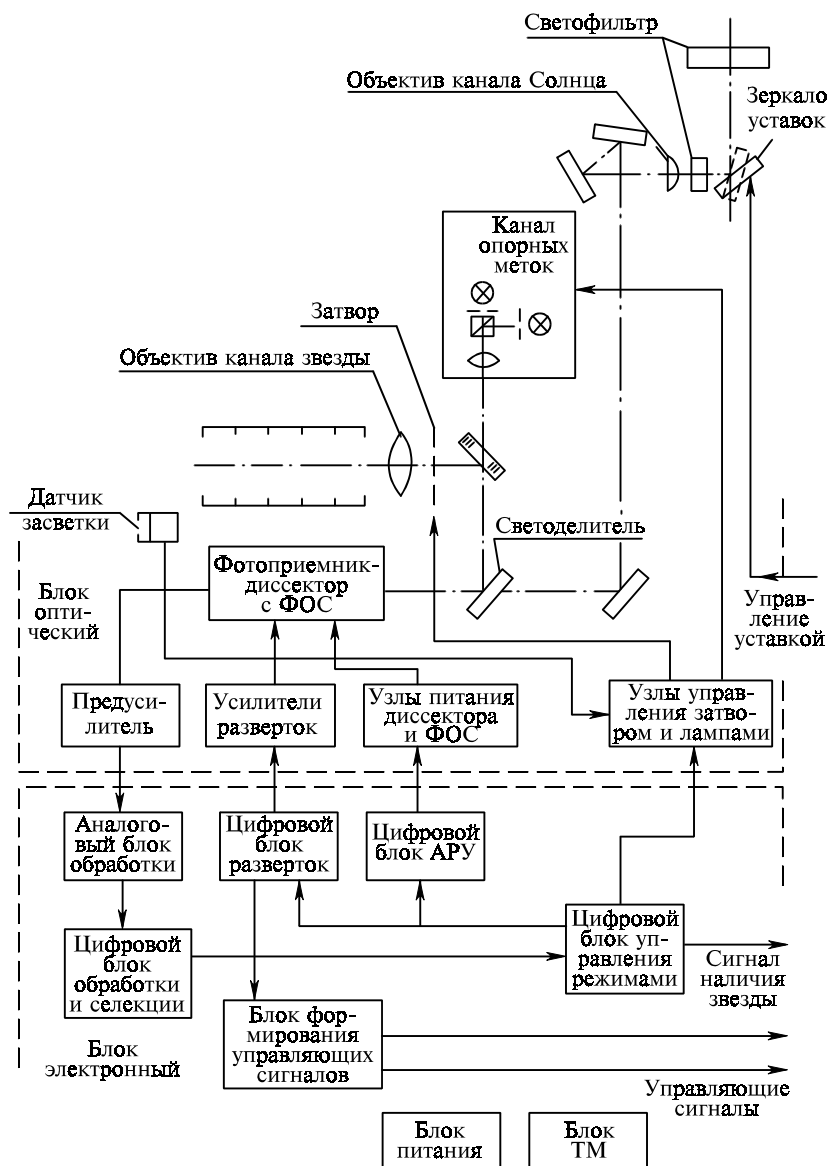


Рис. 4.3. Функциональная схема помехозащищенного звездного прибора солнечно-звездной системы ориентации

Электронный блок содержит:

- аналоговый блок обработки сигналов, выполняющий функции усиления, коммутации видеосигнала, фильтрации его, детектирования, определения рассогласования между центром изображения звезды (или опорной метки) и центром следящего раstra;
- цифровой блок обработки, выполняющий опознавание звезды по четырем признакам: длительности сигнала, амплитуде сигнала, скорости перемещения изображения по фотокатоду, по признаку «3 из 4»;
- цифровой блок формирования разверток X и Y с цифроаналоговыми преобразователями (ЦАП);
- цифровой блок автоматической регулировки усиления (АРУ) с ЦАП АРУ;
- цифровой блок управления режимами работы;
- блок формирования аналоговых управляющих сигналов;
- блок телеметрических (ТМ) усилителей;
- блок питания.

Оптическая система проецирует на фотокатод диссектора три изображения (рис. 4.4): изображение участка звездного неба, изображение Солнца, вытянутое цилиндрической линзой в полюсу, изображение первой или второй (основной и дублирующей) точечных опорных меток, используемых для калибровки прибора по точности и чувствительности. При работе прибора Солнце должно находиться в угловом поле солнечного канала. Взаимное положение угловых полей звездного и солнечного каналов в пространстве предметов прибора показано на рис. 4.5. С помощью введения уставок солнечный канал выставляется таким образом, чтобы на фотокатод диссектора расстояние между изображением Солнца и изображением звезды при ее вхождении в угловое поле было равно некоторому фиксированному значению, постоянному для всех случаев работы прибора. С помощью электронной схемы формируется малая строка поиска с угловым размером $20 \times 5'$, следящая за изображением Солнца и находящаяся на этом фиксированном расстоянии от него. Более подробно работа солнечного канала в оптической системе прибора описана в разд. 3.2.2.

В зависимости от наличия рабочих светил в угловых полях прибор имеет следующие режимы работы: поиск Солнца, поиск звезды, слежение. Когда условия размещения прибора на КА не позволяют обеспечить попадание Солнца в угловое поле солнечного канала, в приборе включается по внешней команде режим поиска звезды без Солнца. В этом случае строка поиска имеет угловой размер $180 \times 5'$.

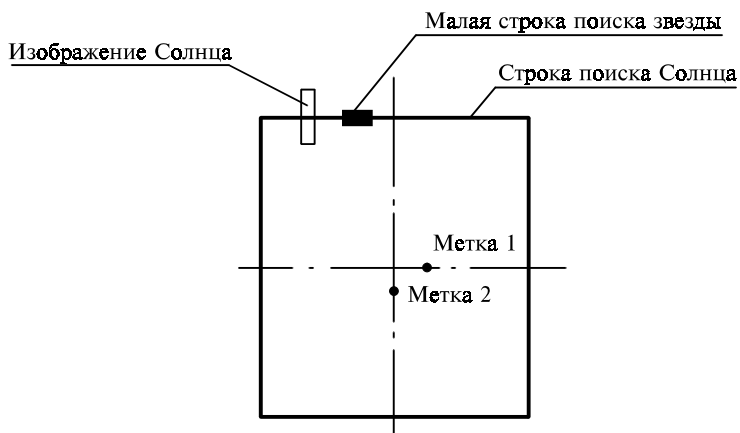


Рис. 4.4. Строки поиска Солнца и звезды, изображения Солнца и опорных меток на фотокатоде диссектора

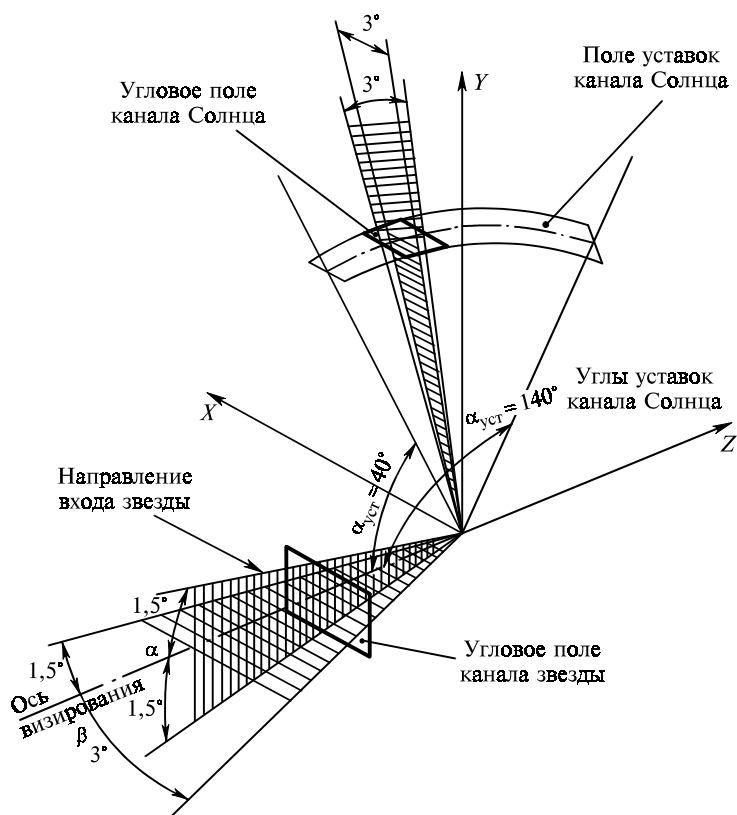


Рис. 4.5. Угловые поля каналов звезды и Солнца в пространстве предметов прибора

Для проверки функционирования по внутреннему опорному источнику имеется режим самоконтроля. Режим поиска Солнца включается сразу после включения прибора, когда изображение Солнца еще не обнаружено. Происходит просмотр строки поиска, расположенной на границе углового поля (рис. 4.4) и имеющей угловой размер $180 \times 5'$. Как только сигнал от изображения Солнца появляется на выходе усилительного тракта, прибор переходит в режим поиска звезды.

В режиме поиска звезды формируется малая строка поиска размером $20 \times 5'$, расположенная от края изображения Солнца на расстоянии, соответствующем углу $27'$. Это расстояние является зоной защиты от Солнца, при сканировании просматривается со скоростью, в 4 раза большей, чем малая строка поиска.

После попадания изображения звезды в малую строку поиска осуществляется опознавание ее по ряду признаков, и прибор переходит в режим слежения. В этом режиме формируется малый растр типа «двойной крест» [47], следящий за положением звезды в угловом поле. В режиме слежения измеряются координаты звезды, формируются управляющие сигналы в виде двух напряжений, пропорциональных проекциям на две взаимно перпендикулярные плоскости угла между осью визирования прибора и направлением на звезду, а также сигнал наличия звезды. Если по каким-либо причинам в угловом поле солнечного канала отсутствует Солнце и прибор выполняет поиск звезды в режиме поиска звезды без Солнца, то просматривается полная строка поиска размером $180 \times 5'$ и при попадании изображения звезды в эту строку прибор переходит в режим слежения.

Во всех режимах работы осуществляется периодическая калибровка прибора по точности и чувствительности сканированием малым растром изображения опорной метки и автоматической настройкой положения электронного раstra и коэффициента передачи усилительного тракта. Калибровка выполняется с частотой 15 Гц, время обращения к опорной метке 4 мс.

Режим самоконтроля, включаемый по внешней команде, служит для проверки функционирования прибора. В этом режиме включается дублирующая опорная метка, производится ее поиск и захват; после перехода в режим слежения формируются управляющие сигналы и сигнал наличия звезды.

Процедура обнаружения звезды и селекция ее на фоне помех при вхождении в строку поиска состоит в следующем. Сигнал с выхода фотоприемника-диссектора через фильтр нижних частот поступает на вход порогового устройства. Фильтр нижних частот по полосе согласован со спектром видеосигнала звезды; полоса пропускания его равна 150 Гц в режиме поиска звезды и 600 Гц

в режиме поиска звезды без Солнца. Если видеосигнал превышает порог в пороговом устройстве, то с последнего выдаются импульсы в цифровой блок селекции. В блоке селекции прежде всего измеряется длительность этого импульса; если длительность превышает некоторое пороговое значение, то сигнал в дальнейшую обработку не поступает. Таким образом, отбраковываются сигналы от близко расположенных «светящихся частиц», создающих на фотоприемнике расфокусированное изображение. Если же импульс видеосигнала соответствует по длительности сигналу звезды, то он поступает на схему селекции «3×4», которая дает подтверждение наличия звезды, если за четыре цикла сканирования малой строкой поиска получено не менее трех импульсов видеосигнала. Схема селекции «3×4» отбраковывает сигналы одиночных импульсов помех. В режиме поиска звезды без Солнца эта схема отключена, так как из-за большего периода сканирования в этом режиме и перемещения изображения звезды по фотокатоду с высокой достоверностью может быть получено не более двух импульсов от звезды.

Если схемой селекции «3×4» сформирован сигнал наличия звезды и выдан в блок управления, то последний включает малый растр и следящую систему, которая совмещает центр малого растра с центром изображения звезды. Одновременно в синхронном детекторе аналогового блока обработки осуществляется накопление сигнала звезды в течение примерно 1 с, после чего накопленный сигнал сравнивается с двумя порогами — верхним и нижним (производится селекция по энергии). Если накопленный сигнал меньше нижнего порога или больше верхнего, то малый растр выключается и поиск продолжается.

Если же проверка селекции по энергии подтверждает наличие звезды, то производится селекция по скорости: проверяется, вошла ли звезда в зону селекции по скорости, представляющей собой полосу шириной около $11'$, параллельную строке поиска и отстоящую от нее также на $11'$. Если и по этому признаку подтверждается наличие звезды, то прибор переходит в режим слежения, т.е. начинает выдавать управляющие сигналы и сигнал наличия звезды. Управляющие сигналы формируются из напряжений, пропорциональных токам разверток. Режим слежения поддерживается все время, пока звезда находится в угловом поле.

Для отслеживания перемещения звезды в угловом поле по каждой оси работает следящая система, в которую входят дискриминатор рассогласования и счетчик развертки, выполняющий функцию интегратора. Код, записанный в счетчик разверток, определяет положение малого растра в угловом поле. Обратная связь в следящей системе замыкается через диссектор и усилительный тракт. Во всех режимах работы прибора периодически

производится калибровка. Во время калибровки на 4 мс включается малый растр, счетчики разверток устанавливаются в положение, соответствующее координатам опорной метки, и с помощью дискриминаторов калибровки определяется рассогласование между центрами малого растра и метки. Сигналы дискриминаторов калибровки поступают на корректирующие входы усилителей развертки и компенсируют рассогласование между центром малого растра и опорной метки. Так выполняется автоматическая регулировка положения электронного растра, с помощью которой достигается совпадение опорной метки с точкой электронного растра, соответствующей кодам метки.

В режиме слежения изображение звезды на фотокатодe может находиться вблизи опорной метки или совпадать с ней. Чтобы в подобной ситуации избежать попадания сигнала звезды в канал калибровки и наоборот, основная метка выключается, если изображение звезды находится в защитной зоне метки размером $22 \times 22'$, и включается дублирующая метка (рис. 4.4).

Одновременно с системой автоматической подстройки положения растра работает система АРУ. Импульсы сигнала метки детектируются, результат сравнивается с двумя порогами. Если сигнал детектора АРУ отличается от номинального значения, то изменяется напряжение питания диссектора так, чтобы привести коэффициент передачи всего усилительного тракта к требуемому значению.

Освещенность опорной метки такова, что сигнал от нее совпадает с номинальным значением сигнала от рабочей звезды; для каждой рабочей звезды эта освещенность выставляется индивидуально при настройке прибора путем регулирования тока опорной лампы. При работе по звезде чувствительность прибора по внешней команде выставляется соответственно выбранной рабочей звезде. Для защиты от воздействия повышенной освещенности на фотоприемник в приборе имеется датчик засветок, по сигналу которого закрывается электромеханический затвор.

Данный прибор использовался на орбитальной станции «Салют-4» для ее ориентации по звездам во время проведения научных экспериментов.

4.1.3. Астровизирующий прибор с подвижным угловым полем

В начале 1970-х годов в связи с дальнейшим развитием космической техники возникла необходимость создания для систем управления КА отечественного звездного прибора высокой чувствительности и помехозащищенности с подвижным угловым полем, перемещающимся в пределах полусферы. Поскольку при таком большом диапазоне углов перемещения оси визирования

применение герметичных конструкций практически исключается, одной из главных задач, которые решались в процессе разработки, было создание прецизионных кинематических передач, работающих в глубоком вакууме. Чтобы упростить решение этой задачи, необходимо было прежде всего свести к минимуму количество таких передач в приборе. Это было одной из главных причин использования фотоприемника с электронным сканированием — диссектора.

Другая не менее важная причина использования принципа электронного сканирования — необходимость реализации достаточно сложных функций: поиска звезды и измерения ее координат при сравнительно больших скоростях разворота КА относительно звезд (работа на подвижном основании), выбора звезды в угловом поле с наибольшим блеском, слежения за звездой в течение длительного времени — до нескольких десятков минут. Все эти функции должны выполняться при действии световых помех, реально существующих на КА.

В приборе использованы методы пространственно-временной обработки сигналов и схемы, описанные в предыдущем разделе. Поэтому при изложении работы прибора не будем подробно останавливаться на этих общих моментах, отразим лишь отличительные особенности схем обработки, связанные со спецификой решаемой задачи.

Астровизирующий прибор предназначен для поиска рабочей звезды, слежения за ней при эволюциях КА и измерения ее угловых координат в связанной с корпусом прибора системе координат. Прибор состоит из трех блоков: блока оптического, блока электронного и солнцезащитной крышки (СЗК); оптический блок и СЗК размещаются на корпусе КА в открытом космосе, электронный блок — в гермоотсеке КА. Прибор имеет резервный комплект электронных узлов, переход на который выполняется по команде.

Основные технические характеристики прибора:

- рабочие звезды — звезды, эквивалентные в фотометрической системе прибора звездам спектрального класса G2-V, имеющим звездную величину от 3,0 до $-0,75$ в системе V;
- допустимая яркость равномерного мешающего фона от 0,1 до $1,6 \text{ кд/м}^2$ в зависимости от диапазона чувствительности;
- поле поиска звезды (угловое поле) $3 \times 3^\circ$;
- обеспечение обнаружения в поле поиска звезды с наибольшим блеском, при этом рабочая звезда должна иметь не менее чем на одну звездную величину больший блеск, чем другие звезды в поле поиска;
- диапазон углов разворота оси визирования по азимуту (угол α) от $+140$ до -140° , по возвышению (угол γ) от -3 до $+85^\circ$;

- предельная погрешность измерения координат звезды в связанной с корпусом прибора системе координат по углу α не более $(2 + 3/\cos \gamma)'$, по углу γ не более $5'$;
- допустимая скорость движения основания прибора относительно рабочей звезды при поиске $(0,07 \pm 0,03)$ град/с, при слежении до 0,3 град/с;
- допустимые углы между рабочей звездой и Солнцем не менее 40° , между рабочей звездой и краем конструкции КА не менее 20° ;
- масса прибора не более 35,5 кг, в том числе оптического блока не более 23,3 кг, электронного блока не более 11 кг, СЗК не более 1,2 кг;
- энергопотребление прибора от источника постоянного тока с напряжением 27^{+5}_{-3} В при поиске не более 50 Вт, при слежении не более 60 Вт, при наведении по одной оси не более 75 Вт, при наведении по двум осям не более 100 Вт;
- гарантируемый ресурс прибора 1500 ч.

Предусмотрена защита прибора от повышенных засветок Солнцем с помощью затвора многоразового действия, закрывающегося по сигналам от датчика засветок при нахождении Солнца под углом менее 40° к оси визирования. Для защиты от попадания посторонних предметов и пыли на оптические элементы прибора на его бленде имеется крышка одноразового действия, открываемая по внешней команде.

На рис. 4.6 и 4.7 представлены оптическая и функциональная схемы прибора (резервирование электронных узлов в функциональной схеме не показано). Основные узлы прибора расположены в оптическом и электронном блоках. В составе оптического

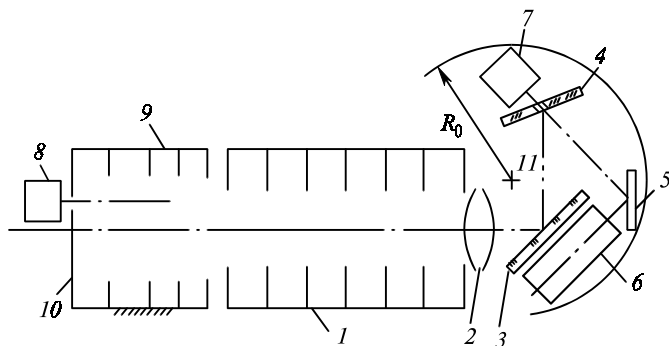


Рис. 4.6. Оптическая система астроизирующего прибора с подвижным угловым полем:

1 — бленда; 2 — объектив; 3–5 — плоские зеркала; 6 — диссектор; 7 — блок канала эталона (узел опорной метки); 8 — блок канала имитатора звезды; 9 — бленда СЗК; 10 — диафрагма с отверстием; 11 — проекция оси внутренней рамки (телеблока); R_0 — заданный радиус обметания телеблока

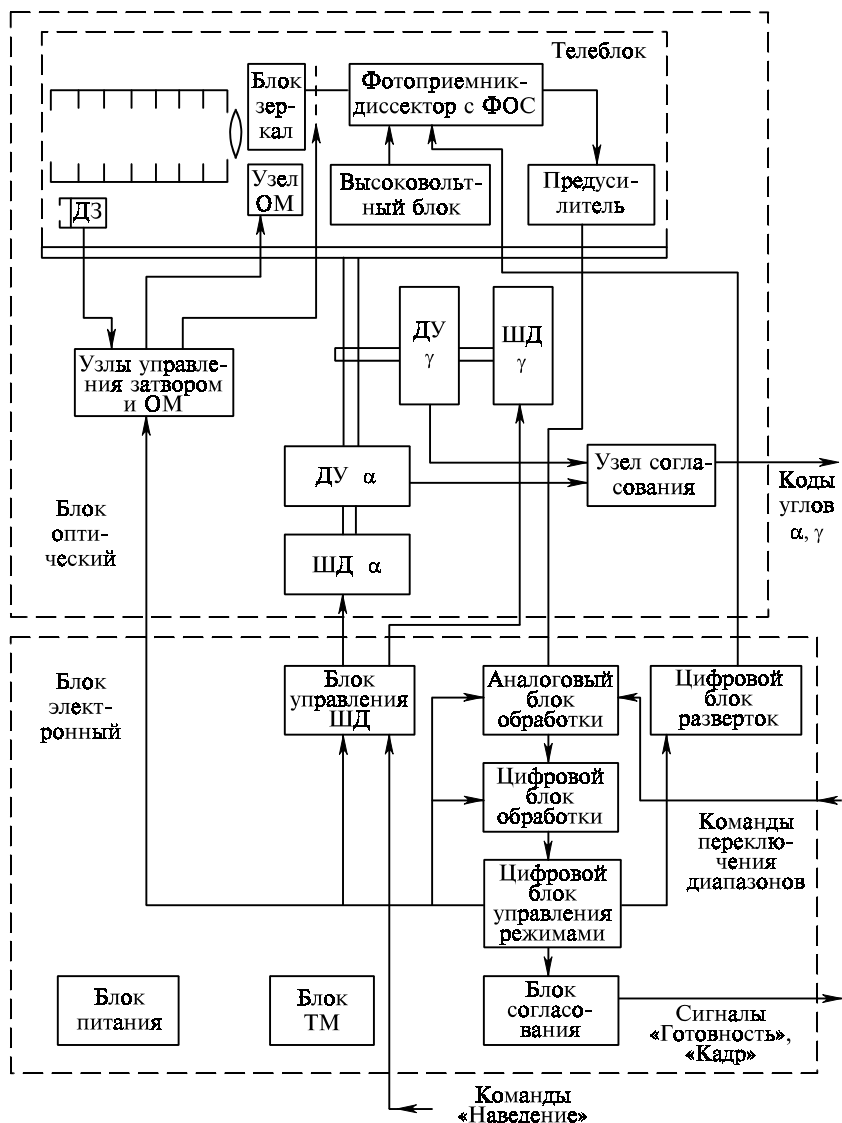


Рис. 4.7. Функциональная схема астровизирующего прибора с подвижным угловым полем

блока имеется телеблок — подвижная часть, содержащая оптическую систему и минимально необходимый для ее работы набор электронных узлов. Солнцезащитная крышка служит для защиты прибора от солнечного излучения в исходном положении, одновременно в ней размещается имитатор точечного изображения для проверки функционирования прибора (на функциональной схеме СЗК не показана).

В качестве наглядного аналога этого прибора можно рассматривать кодовый теодолит, который содержит неподвижное основание, внешнюю (алидаду) и внутреннюю рамки подвеса, на которой размещен телеблок, формирующий угловое поле прибора. По осям подвеса размещены привода и преобразователь «угол–код» (датчики углов поворота его рамок).

Оптическая система прибора (рис. 4.6) состоит из имитатора звезды, размещенного в СЗК, и приемной оптической системы, расположенной в подвижном телеблоке оптического блока. В СЗК входит бленда 9 и имитатор звезды 8. Геометрическая схема бленды 9 и ее размещение относительно бленды 1 телеблока (в исходном положении) таковы, что при любом положении Солнца относительно прибора оно не создает помех и можно проводить проверку функционирования прибора. Эту проверку осуществляют при включенном блоке 8, который представляет собой малогабаритный линзовый коллиматор, имитирующий одну звезду. Так как внутренние диаметры диафрагм бленды 9 больше диаметров диафрагм бленды 1, то это позволяет при небольших угловых поворотах телеблока имитировать смещение звезды в пределах углового поля прибора. При работе прибора по рабочим звездам телеблок повернут относительно СЗК на углы, не допускающие засветку боковыми помехами выходного окна бленды 1.

Оптическая система телеблока состоит из бленды 1, линзового объектива 2, блока плоских зеркал 3–5, диссектора 6, фотокатод которого сопряжен с фокальной плоскостью объектива 2, и блока канала эталона 7 (узел опорной метки — ОМ), излучение от которого проходит через отверстие в зеркале 4. Сам блок 7 представляет собой проекционную систему, которая формирует на фотокатоде неподвижное точечное изображение.

В идеале при конструировании приборов типа кодового теодолита необходимо обеспечить, чтобы ось вращения внутренней рамки подвеса проходила через центр тяжести телеблока. Это требование и предопределило использование блока из трех зеркал 3–5, посредством которых практически удалось совместить ось вращения телеблока с его центром тяжести (точка II , рис. 4.6), уменьшить его заданный радиус обметания (R_0) и, в конечном счете, оптимизировать габаритные размеры и массу прибора.

Помимо рассмотренных выше оптических узлов в оптический блок входят (рис. 4.7):

- диссектор с фокусирующей и отклоняющими катушками, осуществляющий сканирование и преобразование оптических сигналов в электрические;
- преусилитель;

- шаговые двигатели ШД α , ШД γ , которые через соответствующие редукторы осуществляют разворот оси визирования прибора по углам α и γ .
- узел управления включением опорной метки;
- фотоэлектрические преобразователи угол–код (датчики угла — ДУ) по углам α и γ с узлом согласования;
- датчик засветки (ДЗ) Солнцем, узел управления затвором и затвор, которые обеспечивают защиту работающего прибора от повышенного уровня освещенности;
- высоковольтный преобразователь диссектора, блок питания со стабилизатором тока фокусировки (последний на схеме не показан).

В блок электронный входят следующие основные узлы:

- аналоговый и цифровой блоки обработки сигналов, осуществляющие усиление видеосигнала и его обработку для обнаружения сигнала звезды и измерение его параметров, а также калибровку прибора по чувствительности (АРУ);
- цифровой блок формирования разверток, формирующий сигналы управления разверткой при сканировании в пределах всего углового поля и при сканировании малым растром;
- блок управления режимами, осуществляющий синхронизацию работы всех узлов и включение тех или иных режимов работы прибора в зависимости от поступающих извне команд и наличия или отсутствия сигнала звезды, в блоке управления находится схема определения нестабильности электронного раstra и ее учета путем задания в усилителе разверток соответствующих сигналов коррекции в дополнение к сигналам, формируемым блоком разверток (схема коррекции);
- блок управления шаговыми двигателями (электронный коммутатор шаговых двигателей), формирующий токи управления шаговыми двигателями;
- блок согласования, осуществляющий прием внешних команд и выдачу сигналов о готовности прибора к выдаче информации об углах визирования на рабочую звезду (сигнал «Готовность») и о обнаружении звезды при поиске (сигнал «Кадр»);
- блок формирования телеметрических (ТМ) сигналов;
- блок питания.

Прибор работает следующим образом. В исходном положении ось визирования развернута таким образом, что угловое поле перекрывается СЗК. По команде включения первые 10 с выполняется режим эталонирования. При этом на фотокатод диссектора проецируется опорная метка в виде светлой точки, координаты которой в угловом поле строго фиксированы относительно баз подвижной части прибора (телеблока), а световой

поток соответствует световому потоку от звезды величины $-0,75$. На время режима эталонирования в блоке разверток устанавливаются постоянные коды разверток, соответствующие номинальному положению опорной метки. С помощью схемы коррекции положения растра, находящейся в блоке управления, осуществляется построчное сканирование центральной зоны углового поля размером $45 \times 45'$. После обнаружения сигнала опорной метки производится слежение за ней малым растром типа «двойной крест» [47], в процессе которого выполняется коррекция положения всего электронного растра и автоподстройка чувствительности (АПЧ).

По окончании режима эталонирования коэффициент передачи фотоэлектронного тракта отрегулирован по сигналу опорной метки, а в счетчиках коррекции записаны коды, которые, будучи преобразованными в соответствующие напряжения, компенсируют смещение центра электронного растра от номинального положения. В дальнейшем в режиме измерения подстройка положения центра растра по опорной метке периодически повторяется.

Выведение оси визирования прибора в заданное положение выполняется по внешним командам «Наведение $+\alpha$ », «Наведение $-\alpha$ », «Наведение $+\gamma$ », «Наведение $-\gamma$ », которые включают соответствующий шаговый двигатель для разворота телеблока в требуемом направлении. В процессе разворота периодически опрашиваются преобразователи угол-код и по достижении заданного угла снимаются команды наведения.

Режим поиска в приборе включается по команде «Поиск». При этом начинается сканирование углового поля по траектории «стягивающегося квадрата» (рис. 2.5, е). Такая поисковая траектория позволяет оптимизировать параметры поисковой процедуры при работе на подвижном основании. Предварительно должен быть установлен диапазон чувствительности прибора подачей одной из команд «Диапазон 1», «Диапазон 2», «Диапазон 3», «Диапазон 4», переключающих коэффициент усиления в аналоговом блоке обработки. При этом устанавливается такое усиление, чтобы сигнал на выходе детектора для самой слабой звезды данного диапазона равнялся номинальному. В момент обнаружения звезды прекращается сканирование по траектории «стягивающегося квадрата», включается сканирование малым растром типа «двойной крест» и начинается электронное слежение (с помощью кодов разверток) этим малым растром за обнаруженным источником излучения. Если наличие сигнала звезды подтверждено, включается схема подстройки порога. По сигналу с выхода детектора начинают подниматься пороги обнаружения до тех пор, пока не достигнут половины от сигнала звезды с выхода детектора. Пороговое значение запоминается.

После подстройки порогов сканирование продолжается. Если в угловом поле имеется звезда с бóльшим блеском, то при ее обнаружении опять происходит увеличение порогов, так что, когда траектория сканирования доходит до центра, в памяти записан код порога, соответствующий звезде с наибольшим блеском. При повторном просмотре углового поля звезды, блеск которой меньше наибольшего блеска обнаруженных при первом просмотре звезд на одну звездную величину, не обнаруживаются.

Чтобы уменьшить скорость перемещения звезды в угловом поле во время поиска, происходит разворот телеблока в сторону, противоположную орбитальному движению КА, со скоростью, равной скорости орбитального движения. Однако и при этом, если рабочая звезда при первом просмотре была обнаружена близко к краю углового поля, ко времени второго просмотра она может выйти из углового поля из-за действия остаточных скоростей КА. Чтобы исключить это, при первом просмотре во время подстройки порогов одновременно запоминается положение анализируемой звезды относительно центра углового поля (выше или ниже центра, справа или слева от центра). Прежде чем начать повторный поиск, угловое поле прибора сдвигается в сторону, соответствующую положению звезды относительно центра, на величину максимально возможного смещения звезды за время до повторного обнаружения.

При повторном просмотре обнаруживается звезда с наибольшим блеском, и начинается слежение за ней малым растром. Координаты звезды в системе координат, связанной с угловым полем, в виде двоичных кодов хранятся в памяти разверток. Для совмещения оси визирования прибора с направлением на звезду включают шаговые двигатели и начинается перемещение углового поля (приведение). Малый растр продолжает следить за звездой, перемещаясь за ней к центру углового поля, и коды разверток соответствующим образом меняются. Движение прекращается, когда коды разверток становятся точно равными кодам центра углового поля. В это время электронная следящая система отключается, сигналы дискриминаторов в аналоговом блоке обработки управляют импульсами, действующими на шаговые двигатели, и начинает работать электромеханическая следящая система. В это время прибор формирует сигнал «Готовность», свидетельствующий о переходе в режим измерения и готовности прибора к выдаче информации об угловых координатах звезды. Если в процессе поиска звезда не обнаружена, то выдается сигнал «Кадр». В режиме измерения малый растр формируется в центре углового поля и по сигналам рассогласования дискриминаторов работает электромеханическая следящая система, обеспечивающая слежение

за звездой путем разворота телеблока. В это время ось визирования прибора совпадает с направлением на звезду, координаты звезды снимаются с преобразователей угол–код, расположенных на осях карданного подвеса. Режим измерения периодически через каждые 8 с прерывается на 0,04 с для коррекции положения электронного раstra так же, как это происходит в режиме эталонирования.

Из приведенного описания видно, что данный прибор является функционально и конструктивно весьма сложным оптико-электронным информационным устройством. В нем функционируют семь следящих систем (две — слежение по координатам X , Y за звездой, две — автоподстройка электронного раstra по координатам X , Y , одна — автоподстройка чувствительности, две — электромеханическое слежение по углам α , γ), причем их работа взаимосвязанно управляется и чередуется. В его конструкцию входят прецизионные механические передаточные узлы с парами трения, способные длительное время работать в открытом космосе. Тем не менее в процессе эксплуатации прибор показал высокую надежность и эффективность.

Приборы подобного типа успешно работали на многих КА серии «Космос», решая задачи как ориентации аппарата, так и навигации. Два таких прибора более 10 лет работали в составе модулей орбитальной станции «Мир».

4.1.4. Прибор ориентации по Полярной звезде

Прибор ориентации по Полярной звезде проектировался в конце 1970-х годов и предназначен для использования в системе ориентации КА, находящихся на геостационарной орбите в течение длительного времени — до 5 лет и более. Целесообразность разработки специализированного прибора для работы по Полярной звезде вызывалась несколькими обстоятельствами:

- необходимостью обеспечить высокую надежность при непрерывной работе в течение нескольких лет;
- совокупностью требований по основным параметрам — точности, чувствительности, угловому полю;
- прогнозируемым большим объемом поставок приборов.

Требование обеспечения большого срока службы предопределило особенности построения прибора — практически полное исключение подвижных элементов, максимальное упрощение схемы, уменьшение числа электрорадиоизделий. Это достигнуто применением фотоприемника с электронным сканированием — диссектора, а также передачей функции калибровки прибора по точности в ЭВМ системы ориентации.

Прибор выполняет поиск Полярной звезды, слежение за ней в пределах углового поля и измерение ее угловых координат в системе координат, связанной с его корпусом. Прибор состоит из двух блоков — блока оптического и блока электронного. Оптический блок размещается в открытом космосе на корпусе КА, электронный блок — в гермоотсеке, прибор имеет резервный комплект электронных узлов, включаемый по команде.

Основные технические характеристики прибора:

- рабочая звезда — Полярная (1,94–2,05 звездной величины);
- яркость допустимого мешающего равномерного фона до 10^{-2} кд/м²;
- угловое поле $10 \times 10^\circ$;
- предельная погрешность измерения координат звезды в связанной с корпусом прибора системе координат $3'$;
- допустимая скорость угловых колебаний основания относительно направления на рабочую звезду при поиске 0,05 град/с, при слежении 0,2 град/с;
- допустимые углы между рабочей звездой и Солнцем 60° , рабочей звездой и краем конструкции КА 13° ;
- масса прибора не более 21,5 кг, в том числе масса блока оптического не более 14 кг, масса блока электронного не более 7,5 кг;
- энергопотребление прибора от сети постоянного тока напряжением 27^{+5}_{-3} В не более 30 Вт;
- гарантируемый ресурс прибора 55 000 ч.

Оптическая система прибора (рис. 4.8) включает звездный канал, два канала калибрационных сеток и канал точечных имитаторов. В звездный канал входят блenda 1, защитное стекло (пластина) 2, на котором установлена четырехгранная зеркальная призма (пирамида) 3, линзовый объектив 4, в фокальной плоскости которого размещен фотокатод диссектора 6, и дополнительная диафрагма 5. Конструкция бленды двойная (тип А, см. разд. 3.2.1). Первая блenda (без диафрагм) работает по Солнцу, вторая обеспечивает защиту от края конструкции КА. Длина бленды в несколько раз больше фокусного расстояния объектива. Поэтому первые освещенные боковой помехой кромки диафрагм фокусируются вблизи фотокатода диссектора в виде круглого изображения. Освещенность на фотокатоде в этом дефокусированном изображении существенно больше освещенности в линейном поле прибора. Чтобы отсечь рассеянный свет и переотражения (блики) от этого изображения на фотокатоде, применена дополнительная диафрагма 5 (см. разд. 3.3.3). Благодаря такой конструкции удалось существенно снизить освещенность в зоне фотокатода диссектора.

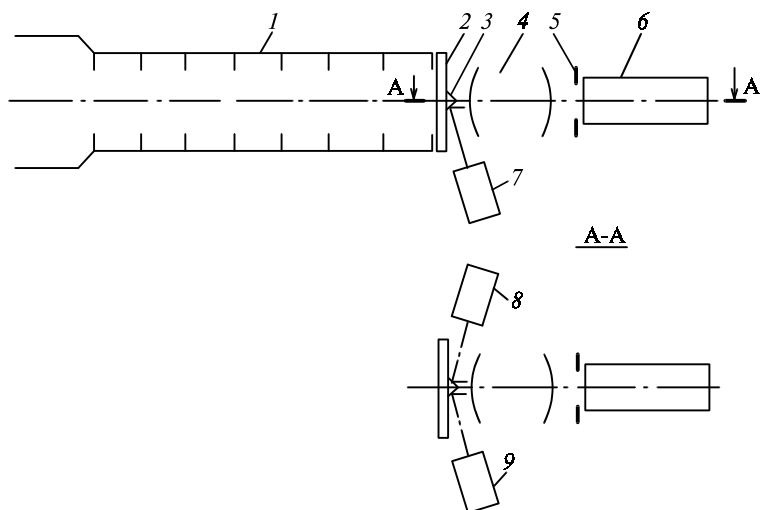


Рис. 4.8. Оптическая система прибора ориентации по Полярной звезде:
1 — бленда; 2 — защитное стекло (пластина); 3 — зеркальная четырехгранная пирамида (призма); 4 — объектив; 5 — дополнительная диафрагма; 6 — диссектор; 7 — блок канала имитатора; 8, 9 — первый и второй блок канала эталона

В приборе имеется три оптических блока 7–9, излучение от которых заводится в объектив посредством зеркальной пирамиды 3. Конструктивно эти блоки представляют собой concentрические зеркальные коллиматоры типа изображенных на рис. 3.6, 3.10. В основном эти коллиматоры различаются рисунками своих сеток. Их выходные зрanchи расположены на зеркальных гранях призмы 3.

При включении первого эталонного блока 8 (канал сетки) в фокальной плоскости объектива 4 (на фотокатод диссектора) возникает изображение параллельных прозрачных штрихов (рис. 4.9, а), а при включении второго эталонного блока 9 (второй канал сетки) появляется изображение, представленное на рис. 4.9, б. Эти два изображения повернуты относительно друг друга на 90° . На рис. 4.9, в показано изображение четырех точек, которое формируется при включении оптического блока канала имитаторов.

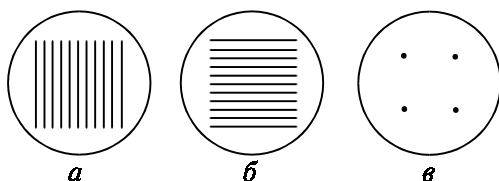


Рис. 4.9. Изображения, формируемые оптическими блоками на фотокатод диссектора

В приборе используются основные функциональные узлы, методы и схемы обработки сигналов, которые были описаны в двух предшествующих разделах. Поэтому функциональную схему прибора не приводим, также как описание функционирования прибора. Отметим лишь несколько особенностей рассматриваемого прибора, отличающих его от предшествующих в части методов обработки сигналов.

Первое отличие состоит в методе калибровки, обеспечивающем точностные характеристики во всем угловом поле. В предшествующих приборах использовалась калибровка по одной опорной точке, что обеспечивало высокую точность лишь вблизи центра углового поля. В рассматриваемом приборе используется калибровка по сетке параллельных линий с последующей интерполяцией. Суть такой калибровки состоит в следующем.

В режиме измерения прибор определяет электронные координаты изображения звезды (цифровые коды электронной развертки) N_1 , N_2 , где N_1 — номер элемента в строке, N_2 — номер строки. При калибровке по оси X на фотокатод проецируется сетка прямых линий, параллельных оси Y прибора (рис. 4.10).

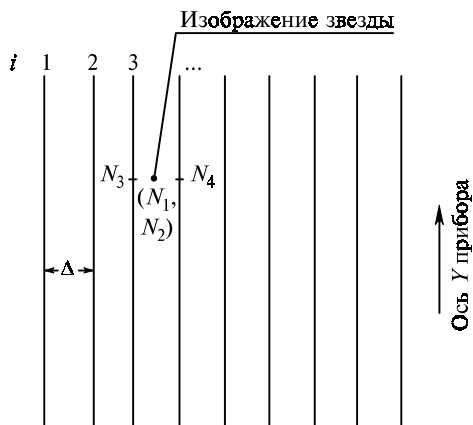


Рис. 4.10. Калибровка по сетке параллельных прямых с интерполяцией

Положение линий относительно базовой системы координат прибора строго фиксировано и выдерживается с высокой точностью. Шаг сетки равен Δ . В процессе калибровки после определения электронных координат звезды N_1 , N_2 производится определение координат N_3 , N_4 двух ближайших к изображению линий сетки. Эта процедура выполняется в той строке раstra, которая соответствует координате N_2 . Угловая координата звезды α_3 получается путем интерполяции

$$\alpha_3 = \frac{N_1 - N_3}{N_4 - N_3} \Delta + \alpha_i,$$

где α_i — угловая координата линии сетки с номером i , записанная в паспорте прибора.

Аналогично выполняется калибровка по координате Y со сменой направления линии сетки и очевидным изменением конечной формулы для угловой координаты звезды

$$\gamma_3 = \frac{N_2 - N_5}{N_6 - N_5} \Delta + \gamma_k,$$

где γ_k — угловая координата линии сетки с номером k , записанная в паспорте прибора.

В рассматриваемом приборе числа $N_1, N_2, N_3, N_4, N_5, N_6$ определяются его схемой, а углы α_3, γ_3 вычисляются в ЭВМ КА. Периодичность калибровки зависит от скорости перемещения звезды в угловом поле и от действия дестабилизирующих факторов. Исходя из первого фактора, калибровку необходимо повторять, как только изображение звезды в процессе движения пересекло опорную линию. Стабильность конструкции прибора позволяет не проводить калибровку до 40 мин, если звезда не перемещается в угловом поле.

Особенностью фотоэлектронного тракта прибора является также работа диссектора в режиме счета фотоэлектронов. Как известно, в этом режиме диссектор генерирует случайную последовательность импульсов (одноэлектронных импульсов), средняя частота которых пропорциональна освещенности просматриваемого участка фотокатода. Использование режима счета фотоэлектронов повышает стабильность коэффициента передачи диссектора и позволяет отказаться от калибровки фотоэлектронного тракта по чувствительности, что упрощает схему прибора.

При работе в режиме счета информация об освещенности на фотокатодe содержится в частоте одноэлектронных импульсов. Поэтому в электронном тракте предусилитель является широкополосным (полоса около 1 МГц), формирующим короткие импульсы стандартной формы. За предусилителем следует счетчик накопитель, подсчитывающий количество одноэлектронных импульсов за время такта развертки и тем самым формирующий цифровой код, пропорциональный освещенности на фотокатодe в данном положении развертки. Дальнейшая обработка выполняется по рассмотренным в предшествующих разделах схемам.

При проектировании прибора в его схему были заложены все разработанные ранее и хорошо зарекомендовавшие себя в предшествующих разработках методы селекции рабочих звезд на фоне

помех. Однако требование по помехозащищенности к прибору, непрерывно в течение нескольких лет работающему по звезде, должны кардинально отличаться от требований к прибору, работающему короткими сеансами. Для непрерывно работающего прибора нельзя исключать ситуацию, когда сосредоточенная световая помеха практически «накрывает» рабочую звезду. Для приборов, работающих по одной звезде короткими сеансами, такое положение считается маловероятным и не рассматривается. Длительно работающий прибор должен различать такую ситуацию и вырабатывать соответствующий сигнал тревоги.

При первых испытаниях прибора в составе КА в полете были обнаружены систематические кратковременные нарушения работы прибора (сбои) — в среднем несколько раз в сутки из-за влияния сосредоточенных световых помех, вызванных освещенными Солнцем частицами газопылевого окружения КА. Внешнее проявление нарушений состояло либо в срыве слежения за звездой и переходе в исходное положение, либо в перемещении малого раstra по угловому полю до границы с последующим срывом слежения.

Вывод о том, что источником помех являются частицы газопылевого окружения, был сделан на основе следующих фактов:

- при работе прибора с закрытым затвором по встроенному имитатору сбои не наблюдались;
- при нахождении КА в тени Земли сбои не наблюдались;
- при выходе КА из тени Земли в первые часы интенсивность сбоев увеличивалась в несколько раз;
- сбои сопровождалась повышением сигнала фона и изменением сигнала звезды;
- при работе прибора в режиме регистрации помех, когда апертура неподвижна, отмечались кратковременные (длительностью несколько секунд) всплески яркости фона с частотой несколько раз в сутки;
- при работе двух приборов в режиме измерения по Полярной звезде случаев одновременного нарушения работы двух приборов не наблюдалось;
- на одном из КА, где проводились регулярные измерения сбоев, в первые дни после вывода на орбиту частота сбоев составляла несколько раз в час и в течение двух недель снизилась до нескольких раз в сутки.

После изучения статистических характеристик наблюдаемых помех (распределения по амплитудам сигналов, длительности, скорости перемещения в угловом поле) разработчиками прибора и системы ориентации КА были разработаны алгоритмы, позволяющие распознавать случаи воздействия помех и отбраковывать

ложную информацию. Принцип построения таких алгоритмов основан на том, что при подходе световой помехи к направлению на звезду начинают меняться регистрируемые прибором параметры — уровень фона, уровень сигнала звезды, ее угловые координаты. Алгоритм обнаруживает хотя бы одно из этих изменений, превышающее норму, и вырабатывает сигнал запрета на то время, пока обнаруженное изменение не устранился, после чего продолжается работа в обычном режиме. На время действия сигнала запрета (что продолжается до 10–15 с) информацию с прибора нельзя считать достоверной, необходимо использовать другие имеющиеся средства на КА — запомненную ранее информацию, показания другого звездного прибора и др.

Прибор ориентации по Полярной звезде длительное время использовался на многих КА, располагавшихся на стационарной орбите, на некоторых продолжает работать и в настоящее время.

4.1.5. Современные звездные приборы — измерители углов трехосной ориентации

Прогресс в развитии элементной базы за последние 10–15 лет, и прежде всего в области фотоприемников и элементов вычислительной техники, в значительной степени изменил подходы к проектированию и использованию звездных ОЭП, их конструкцию и характеристики. Для звездных ОЭП основным типом приемника сегодня является ПЗС-матрица, основным средством обработки информации — микропроцессор с достаточно большими вычислительными возможностями. Благодаря этому конструктивный облик звездных приборов упростился, одновременно увеличилось количество выполняемых функций и их сложность.

Современные звездные приборы определяют угловые координаты не отдельной звезды, а углы трехосной ориентации приборной системы координат относительно мировой системы координат. Это могут быть три угла Эйлера, либо матрица направляющих косинусов, либо кватернион ориентации. Для них не требуется предварительное наведение на рабочие звезды, они выдают информацию об углах ориентации при любом положении углового поля на небесной сфере (за исключением случаев, когда угловое поле засвечивается Солнцем или Землей). Поэтому приборы работают по группе звезд, находящихся в угловом поле. Распознавание этих звезд — одна из функций прибора. Звездный каталог, на основе которого проводится распознавание, становится составной частью прибора. При таком подходе к заданию требований к прибору традиционные параметры: предельные рабочие звезды, размер углового поля — становятся внутренними параметрами прибора, излишними для использования его потребителем, а по-

этому могут не задаваться при проектировании. Важно задать лишь допустимые углы к источникам боковых засветок — Солнцу, Земле, элементам конструкции КА.

В остальном подходы к проектированию звездных приборов сохраняются и те правила, которые изложены в гл. 2, остаются в силе. При реализации этих правил необходимо учитывать особенности используемых ПЗС-матриц:

- в ПЗС-матрицах используется принцип накопления заряда, из которого следует, что изображение на матрице должно мало перемещаться в течение времени накопления; чем большую чувствительность прибора хочет иметь проектировщик, тем меньшую скорость перемещения изображения можно допустить — это обстоятельство накладывает серьезные ограничения на динамические характеристики приборов;
- многие высокочувствительные ПЗС-матрицы имеют встроенный охладитель, который потребляет значительную мощность (как правило, несколько ватт), что требует соответствующего отвода тепла;
- хотя геометрические размеры и конфигурация элементов ПЗС-матрицы высокостабильны, однако положение фоточувствительной площадки относительно базы самой матрицы и базы прибора не может быть абсолютно стабильным во всех условиях эксплуатации; поэтому необходимо применять всевозможные меры, конструктивные и алгоритмические, либо по ограничению этой нестабильности, либо по ее учету;
- определенные сложности при использовании ПЗС-матриц связаны с наличием так называемых дефектных элементов, сигнал с которых соответствует либо уровню черного, либо уровню белого; количество таких дефектных элементов может быть значительным, особенно при большом времени накопления; поэтому должны приниматься специальные алгоритмические меры по обеспечению работы прибора с учетом этих дефектов;
- наличие «геометрического шума» (см. разд. 1.3.1) также вынуждает принимать специальные меры.

Использование принципа накопления сигнала в ПЗС-матрице приводит к определенным особенностям оптимизации режима поиска. Поскольку накопление сигнала во всех элементах матрицы происходит одновременно (параллельный обзор элементов углового поля), а их анализ схемой или алгоритмом обработки поочередно, то время, затрачиваемое на поиск, будет зависеть от времени как накопления, так и работы алгоритма анализа в каждом элементе. Если время работы алгоритма анализа одного элемента не превышает интервала времени между

поступлением сигналов с двух соседних элементов, то общее время поиска может определяться только временем накопления. Если же время работы алгоритма анализа больше, чем период поступления сигналов с элементов матрицы, то общее время, затрачиваемое на поиск, будет определяться еще и суммой времен исполнения алгоритма обработки сигнала каждого элемента. Поэтому оптимизация этого алгоритма весьма и весьма важна.

Звездные приборы, разработанные на основе изложенного подхода, сегодня выпускаются как зарубежными, так и отечественными предприятиями [2, 52, 72, 78]. Функциональная схема такого прибора практически типовая и достаточно проста (рис. 4.11). Она включает объектив с блендой, ПЗС-матрицу, аналоговый блок обработки сигналов матрицы и управления матрицей, вычислительный блок, датчик засветки, узел управления затвором. Наличие элементов, обеспечивающих защиту ПЗС-матрицы от перегрузок при прямом попадании Солнца в угловое поле, зависит от того, идет ли проектировщик на риск деградации параметров матрицы или нет. Хотя имеется обширная информация о том, что ПЗС-матрицы выдерживают прямые воздействия солнечного излучения, однако разработчики высокочувствительных матриц не рекомендуют этим злоупотреблять.

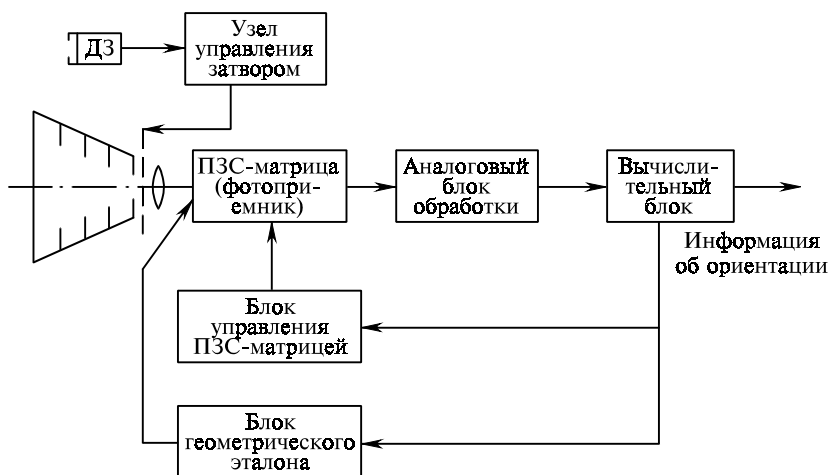


Рис. 4.11. Функциональная схема современного звездного прибора

В отличие от традиционных схем, приведенных в указанной выше литературе, в схеме на рис. 4.11 введен блок геометрического эталона. Необходимость его применения определяется требованиями по точности, предъявляемыми к прибору (подробнее об этом см. ниже).

В фокальной плоскости объектива изображение звезды на матрице занимает несколько элементов, чтобы иметь возможность осуществлять интерполяцию для определения координат центра изображения с точностью до долей элемента.

Назначение основных элементов функциональной схемы вытекает из их названия. В аналоговом блоке обработки производятся такие стандартные операции, как двойная коррелированная выборка, регулировка усиления, преобразование в цифровой код. Основная часть обработки информации выполняется программно в вычислительном блоке. Алгоритмы цифровой обработки реализуют, по существу, все главные функции прибора:

- поиск имеющихся в угловом поле источников излучения, их обнаружение и предварительное определение координат на матрице;
- селекция звезд на фоне помех, выделение группы звезд для слежения;
- распознавание группы звезд по определенным алгоритмам, принцип построения которых основан на сравнении межзвездных угловых расстояний обнаруженных звезд с каталожными, хранящимися в памяти прибора (подробнее об алгоритмах распознавания см. [48]);
- уточнение по результатам распознавания группы звезд для последующего слежения;
- точное определение координат звезд на матрице, достигаемое используемым алгоритмом интерполяции, как правило, по формуле центра тяжести или ее модификациям, оптимизированным с учетом повышения помехозащищенности;
- вычисление углов трехосной ориентации, чисто вычислительная задача, сводится к решению переопределенной системы уравнений по методу наименьших квадратов; ввиду нелинейности уравнений и множества вариантов взаимного расположения звезд процедура решения не стандартная;
- оценка скорости движения звезд в угловом поле, прогноз входящих и выходящих звезд при этом движении.

Особое место занимает вопрос учета систематических и медленно меняющихся погрешностей прибора. Систематические погрешности определяются при наземной паспортизации на специальных высокоточных стендах. В бортовом приборном программном обеспечении предусматривается специальный алгоритм учета результатов наземной паспортизации. Таким образом учитываются погрешности механической сборки в пределах допусков, дисторсия оптической системы и т.п. Сложнее обстоит дело с погрешностями, медленно меняющимися из-за влияния условий эксплуатации, деградации электрорадиоизделий и материалов. Принимать ли какие-либо меры для исключения

этих погрешностей и какие именно, зависит от предъявляемых к прибору требований по точности. При требованиях к полной предельной погрешности порядка $1'$ можно обойтись простейшими конструктивными мерами по рациональному закреплению узлов объектива и матрицы. При более высоких требованиях необходимо предусматривать какие-либо нетрадиционные способы сочленения объективов с матрицей либо вводить канал геометрического эталона и проводить калибровку по опорным световым меткам, как это делалось в предшествующих разработках. В некоторых случаях можно использовать полетную калибровку по звездам в комплексе с целевой аппаратурой. Это возможно тогда, когда целевая аппаратура способна воспринимать излучение звезд. (Различные варианты такой калибровки рассмотрены в [22, 66].)

Характеристики, достижимые сегодня для приборов, построенных на базе описанных подходов, весьма высокие. При этом изготовители приборов по большей части, за редким исключением, не сообщают о полной предельной погрешности ввиду сложности ее измерения, ограничиваясь лишь указанием шумовой составляющей.

Звездный прибор, построенный с использованием изложенных правил, осуществляет распознавание групп звезд и определяет матрицу направляющих косинусов углов трехосной ориентации приборной системы координат относительно геоцентрической.

Основные характеристики прибора [52]:

- предельная погрешность определения углов ориентации по осям X, Y — $25''$, по оси Z — $65''$;
- масса прибора не более 3 кг;
- угол защиты от Солнца 40° .

Дополнительно в качестве справочных можно назвать такие внутренние параметры прибора:

- размер углового поля $22 \times 17^\circ$;
- рабочие звезды до +5 звездной величины;
- частота выдачи информации 4 Гц;
- шумовая составляющая погрешности (3σ) по осям X, Y около $16''$, по оси Z около $60''$.

4.2. Земные ОЭП ориентации и навигации инфракрасного диапазона

4.2.1. Датчики наличия Земли

Датчики наличия Земли предназначены для определения нахождения Земли в их угловом поле. Ниже рассмотрен датчик, у которого имеется два угловых поля: опорное и рабочее. Эти

поля направлены в диаметрально противоположные стороны (рис. 4.12). Сигнал наличия Земли формируется тогда, когда одно угловое поле направлено на Землю, а другое в космос.

Основные параметры этого датчика:

- диаметр угловых полей (рабочего и опорного) $2^\circ 50'$;
- рабочий диапазон длин волн от 7 до 20 мкм;
- напряжение сигнала наличия Земли (НЗ) от 2,3 до 7 В положительной полярности для рабочего поля и отрицательной полярности для опорного поля;
- напряжение сигнала наличия Солнца (НС) от 2,5 до 7 В положительной полярности;
- напряжение питания 28_{-5}^{+6} В;
- потребляемая мощность не более 2 Вт (без системы обогрева);
- мощность, потребляемая системой обогрева $(8 \pm 0,6)$ Вт (при напряжении 23 В);
- масса не более 2,5 кг;
- ресурс 30 000 ч.

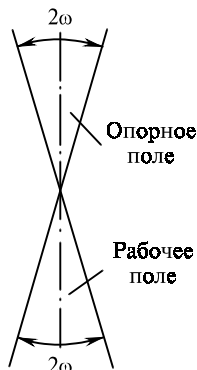


Рис. 4.12. Угловое поле датчика наличия Земли

Функциональная схема прибора представлена на рис. 4.13. Излучение Земли, находящейся в одном из угловых полей (рабочем или опорном), отразившись от зеркала, попадает в объектив, а затем через модулирующую шторку и фильтр — на пироэлектрический приемник излучения. Фаза модуляции оптического сигнала по отношению к опорному сигналу генератора разная в зависимости от того, через какое угловое поле излучение попало в прибор. В составе блока усилителя имеется фазочувствительный детектор (ФД), поэтому напряжение на его выходе будет иметь различную полярность в зависимости от фазы модулированного сигнала. В результате на выходе прибора сигнал НЗ будет иметь положительную полярность, если Земля находится в рабочем поле, и отрицательную, если Земля — в опорном поле.

Если в одном из угловых полей присутствует Солнце, сигнал от которого превышает сигнал от Земли, то в блоке формирования НС формируется положительный сигнал независимо от того, в каком поле находится Солнце.

Генератор привода вибромодулятора — электромеханический, его основные элементы — катушка электромагнита и транзисторный ключ. Генератор обеспечивает колебания вибромодулятора с модулирующей шторкой и генерацию опорного напряжения для фазочувствительного детектора.

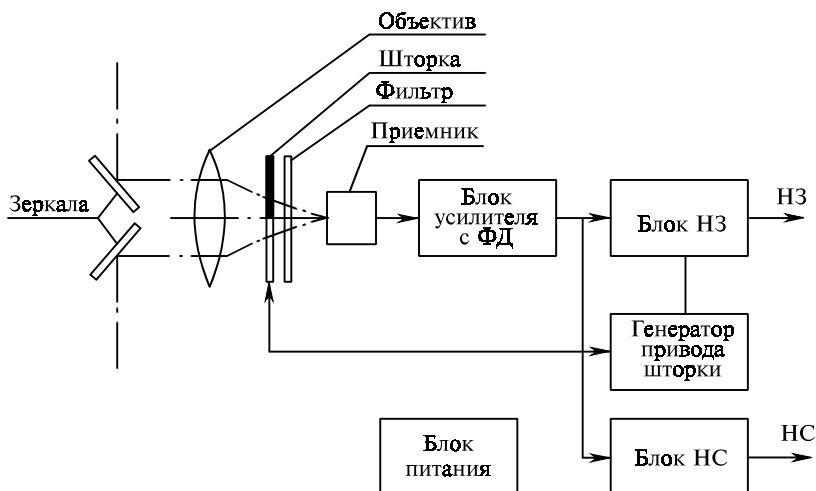


Рис. 4.13. Функциональная схема датчика наличия Земли

В приборе также имеется блок питания, преобразующий напряжение бортовой сети в напряжения, необходимые для работы электронных узлов прибора.

Приборы подобного типа использовались на многих космических аппаратах в 1970–1980-х годах.

4.2.2. Построители местной вертикали

В приборах, относящихся к построителям местной вертикали, реализован принцип так называемого кругового сканирования. Эти приборы получили достаточно широкое распространение. Принцип кругового сканирования состоит в том, что угловое поле сканирует по окружности, угловой радиус которой совпадает с угловым радиусом Земли, а сигнал приемного устройства детектируется двумя фазочувствительными детекторами, которые формируют сигналы, определяющие отклонение оси визирования прибора от вертикали в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (рис. 4.14). Когда ось визирования совпадает с направлением на центр Земли (левая часть рисунка), на выходе приемного устройства прибора модуляция сигнала с частотой сканирования отсутствует. Когда ось визирования отклонена на некоторый угол β от центра Земли (правая часть рисунка), сигнал приемника модулируется с частотой сканирования, причем амплитуда этой модуляции тем больше, чем больше угол отклонения, а фаза указывает направление отклонения.

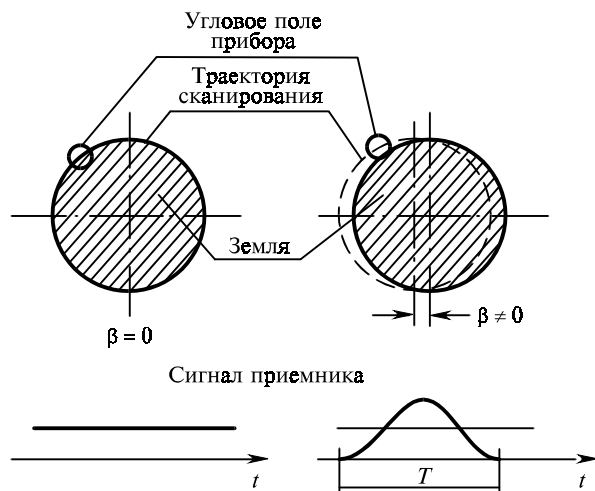


Рис. 4.14. Принцип кругового сканирования (β — угол отклонения оси визирования от вертикали, T — период сканирования)

Рассмотрим один из вариантов такого прибора, имеющий реальное конструктивное воплощение. В приборе реализуется принцип кругового сканирования, однако закон сканирования более сложный, чем описано выше. Смысл этого усложнения будет ясен из дальнейшего.

Траектория сканирования представлена на рис. 4.15. Угловое поле совершает сложное движение — на движение по окружности накладывается периодическое смещение вдоль радиуса.

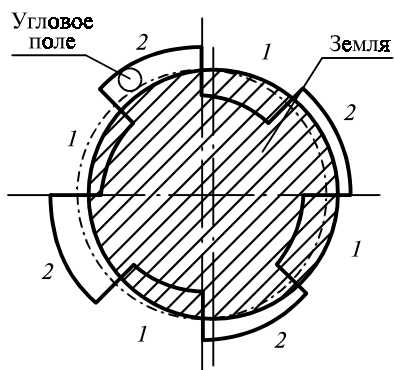


Рис. 4.15. Сканирование в построителе местной вертикали

Результирующая траектория состоит из двух групп участков: четыре участка соответствуют движению по окружности радиусом Θ_1 (обозначены на рисунке 1), четыре — по окружности Θ_2 , $\Theta_2 > \Theta_1$ (обозначены 2). Горизонт Земли при отсутствии отклонения лежит между участками 1 и 2, т.е. участки 1 соответствуют наблюдению горизонта Земли, а участки 2 — наблюдению космоса.

Такое усложнение сканирования имеет двоякую цель. Во-первых, представленная на рис. 4.14 схема сканирования при отсутствии рассогласования не дает модуляции оптического сигнала на приемнике. При использовании болометра дальнейшую обработку сигнала необходимо проводить на постоянном токе,

что связано с большими погрешностями. Если применяется пироэлектрический приемник, то при отсутствии модуляции оптического сигнала его выходной сигнал равен нулю. Использование способа сканирования, представленного на рис. 4.15, решает задачу модулирования. Во-вторых, в схеме рис. 4.15 сигнал приемника кроме модуляции на частоте сканирования имеет модуляцию на четвертой гармонике этой частоты. Амплитуда четвертой гармоники содержит информацию об угловом радиусе наблюдаемого диска Земли. Эта информация используется в приборе для автоматической настройки при изменении высоты полета.

Прибор состоит из трех блоков — блока оптического, блока автоподстройки и блока электронного. Блок оптический работает в условиях открытого космического пространства, блоки автоподстройки и электронный — в условиях герметичного отсека КА.

Основные параметры прибора:

- диапазон высот от 150 до 500 км;
- мгновенное угловое поле 3° ;
- погрешность определения направления на центр Земли, соответствующего нулю управляющих сигналов, не более $14'$;
- крутизна управляющих сигналов по каналам крена и тангажа $(0,4 \pm 0,14)$ В/град;
- диапазон линейности управляющих сигналов 2° ;
- напряжение питания 27^{+7}_{-4} В;
- потребляемая мощность не более 10 Вт, при включении внутреннего излучателя не более 14 Вт;
- масса прибора $7 \pm 1,5$ кг;
- ресурс 3000 ч.

Оптическая система прибора (рис. 4.16) содержит большое количество элементов и узлов, выполняющих достаточно сложные функции. Основные из этих элементов и узлов следующие.

- Сканирующее зеркало *11*, обеспечивающее сканирование оси визирования по конической поверхности (круговое сканирование).
- Симметричная пирамида зеркал (*1–8*) расположена соосно с вышеуказанным конусом сканирования; ее восемь зеркальных граней (зеркал *1–8*), образуют две группы по четыре зеркала (*1, 3, 5, 7* и *2, 4, 6, 8*); зеркала каждой группы располагаются симметрично относительно оси пирамиды (оси конуса сканирования визирной линии) таким образом, что угол между осью пирамиды и гранью зеркала для первой и второй групп отличаются на 1° ; такая пирамида совместно со сканирующим зеркалом *11* обеспечивает просмотр угловым полем восьми участков двух круговых траекторий, отличающихся радиусом на 2° (рис. 4.15). Кроме того, изменяя угол между

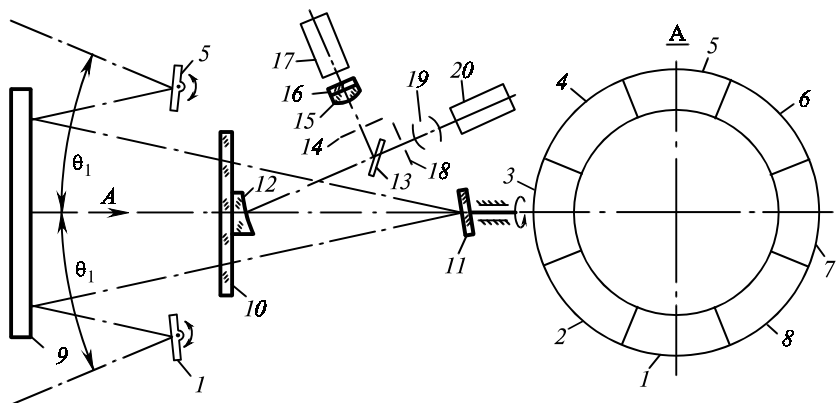


Рис. 4.16. Оптическая система построителя местной вертикали:
1–8 — зеркала; 9 — зеркало; 10 — защитное стекло; 11 — сканирующее зеркало; 12 — параболическое зеркало (объектив); 13 — светоделитель; 14, 18 — полевые диафрагмы; 15, 19 — конденсоры; 16 — светофильтр; 17, 20 — приемник излучения

- гранями при вершине пирамиды, можно менять угловой радиус круговой траектории сканирования и тем самым подстраиваться под изменяющуюся высоту полета КА.
- Зеркальный объектив 12 в виде внеосевого параболоида, формирующий изображение участка Земли или космоса в плоскостях полевых диафрагм 14, 18 канала Земли и канала Солнца через соответствующее светоделительное зеркало 13; угловое поле канала Земли — 3° , канала Солнца — 4° .
 - Излучение в каналах Земли и Солнца попадает на приемник через соответствующие конденсоры 15, 19; в канале Земли перед приемником установлен фильтр 16, отсекающий излучение с длиной волны менее 7 мкм. Применяемые приемники: в канале Земли — болометр 17, в канале Солнца — фоторезистор 20.

Функциональная схема прибора представлена на рис. 4.17. Прибор работает следующим образом. Оптическая система производит обзор пространства по траектории, представленной на рис. 4.15. Излучение Земли (если оно попадает в угловое поле) через оптическую систему попадает на приемник лучистой энергии (ПЛЭ) канала Земли и преобразуется в электрический сигнал, который через предусилитель поступает на два резонансных усилителя (РУ). Резонансный усилитель 20 Гц выделяет первую гармонику сигнала, несущую информацию о величине и направлении рассогласования между направлением на центр Земли и осью визирования прибора. Выделенная первая гармоника детектируется двумя фазочувствительными детекторами

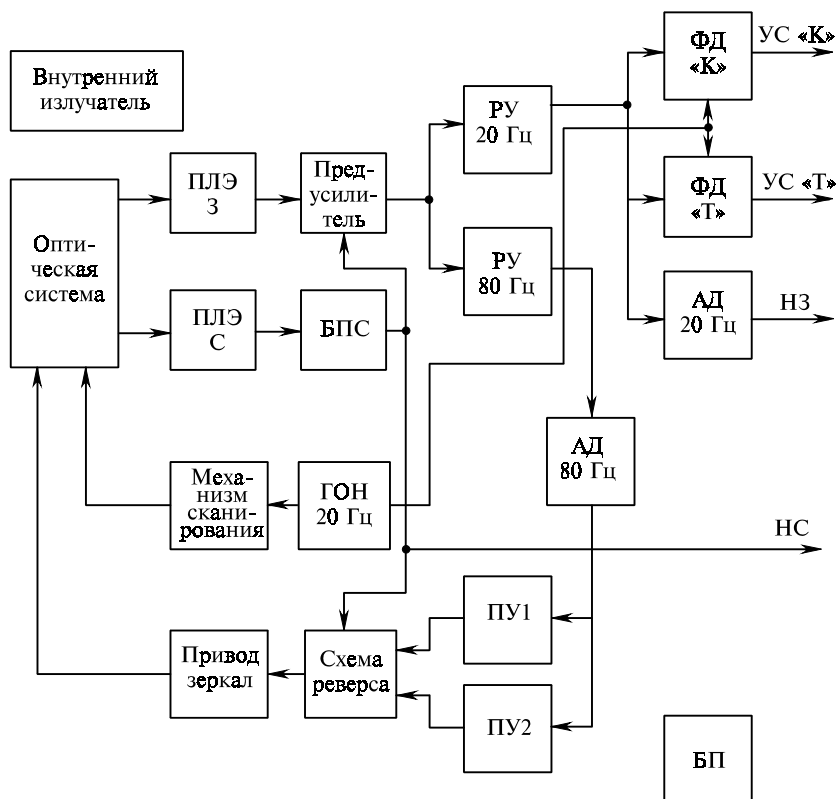


Рис. 4.17. Функциональная схема построителя местной вертикали

(ФД) «К» и «Т», формируя управляющие сигналы (УС) по каналам крена и тангажа. Сигнал первой гармоники детектируется также обычным амплитудным детектором (АД), формируя сигнал наличия Земли в поле при $\beta > 40'$ для телеметрирования. Сигнал четвертой гармоники (80 Гц) детектируется амплитудным детектором и поступает на два пороговых устройства ПУ1 и ПУ2 в канале подстройки зеркал пирамиды.

Пороговые напряжения этих пороговых устройств U'_4 и U''_4 , $U'_4 < U''_4$. Если амплитуда сигнала четвертой гармоники U_4 находится между U'_4 и U''_4 , т.е. $U'_4 < U_4 < U''_4$, это означает, что угол между зеркалами пирамиды соответствует высоте полета, и подстройки его не требуется. Если $U_4 < U'_4$, то диаметр траектории сканирования слишком большой, и его необходимо уменьшить. В этом случае формируется соответствующая команда на привод зеркал пирамиды. Если $U_4 > U''_4$, то диаметр траектории сканирования необходимо увеличить, и на привод зеркал пирамиды подается другая команда. Поскольку такая подстройка может

работать только при небольших углах рассогласования β между осью визирования и центром Земли, то при $\beta > 40'$ в схему реверса подается запрет на подстройку зеркал.

Если в угловое поле канала Солнца попадает Солнце, то на входе блока подавления помехи от Солнца (БПС) появляется сигнал, который поступает на предусилитель и в схему реверса, запрещая формирование управляющих сигналов и подстройку зеркал. Этот же сигнал выдается в систему телеметрии как сигнал НС.

Синхронная работа механизма сканирования и фазочувствительных детекторов обеспечивается генератором опорного напряжения (ГОН) 20 Гц. В приборе имеется также внутренний излучатель для проверки функционирования прибора и блок питания для преобразования первичного напряжения бортсети во вторичные напряжения, необходимые для работы его узлов.

Приборы подобного типа применялись и применяются на многих низкоорбитальных КА, в частности в составе орбитальной станции «Мир» работали два таких прибора.

Существуют модификации построителей местной вертикали и для более высоких орбит, в том числе для геостационарной. Они отличаются конструкцией оптической системы, некоторыми деталями электрических схем, используемой элементной базой. В тех вариантах приборов, которые предназначены для круговых орбит с постоянной высотой, отсутствуют узлы, обеспечивающие подстройку зеркал пирамиды под разные высоты. В более поздних модификациях для формирования сигнала наличия Земли используется не первая, а четвертая гармоника. Основные принципы построения и способы обработки сигналов соответствуют изложенным выше.

4.2.3. Однокоординатные измерители угла отклонения

Измерители угла отклонения представляют собой вторую большую группу приборов ориентации по Земле в ИК-диапазоне, имеющих достаточно широкое применение. В этих приборах реализуется принцип так называемого секущего сканирования. Этот принцип заключается в том, что в приборах организуется сканирование угловым полем (или несколькими угловыми полями) по траектории, пересекающей наблюдаемый диск Земли, формируется сигнальный импульс, нарастающий фронт которого соответствует вхождению углового поля в наблюдаемый диск Земли. Факт достижения этим нарастающим фронтом определенного уровня (например, уровня 0,5 от максимума) принимается за совпадение оси визирования прибора с направлением

на горизонт. Далее по нескольким точкам пересечения траектории сканирования (двум, трем или четырем) с горизонтом Земли схемотехнически или математически определяется угол отклонения базовой оси прибора от направления на центр Земли. Этот принцип поясняется рис. 4.18.

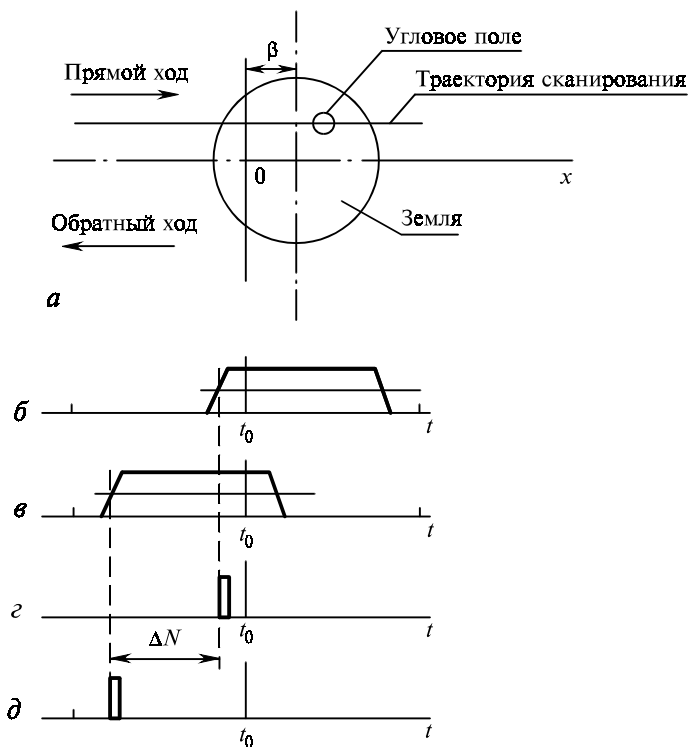


Рис. 4.18. Принцип секущего сканирования:

a — схема сканирования; *б*, *в* — сигналы приемника при прямом и обратном ходе; *г*, *д* — импульсы, соответствующие моментам пересечения траектории сканирования и горизонта при прямом и обратном ходе (β — угол отклонения от вертикали, ΔN — результат измерения прибора, пропорциональный углу отклонения; *O* — точка, соответствующая оси визирования прибора)

Рассмотрим однокоординатный вариант подобного прибора, используемого до настоящего времени на некоторых типах КА. Прибор определяет угол отклонения его оси визирования от направления на центр Земли в одной из координатных плоскостей, параллельной направлению сканирования (угол β).

Основные параметры этого прибора:

- поддиапазоны высот (переключаются по команде): малые высоты (режим A_M) — от 180 до 10 000 км, большие высоты (режим A_B) — от 10 000 до 40 000 км;

- пределы измерения угла отклонения β от -1° до $+1^\circ$;
- пределы отклонений оси визирования от вертикали в плоскости, перпендикулярной направлению сканирования (по углу α), обеспечивающие точные измерения от -3° до $+3^\circ$ в режиме A_M , от -1° до $+1^\circ$ в режиме A_6 ;
- полная предельная погрешность измерения угла β не более $15'$ для режима A_6 и не более 1° для режима A_M ;
- предельная погрешность измерения угла β , исключая шумовую погрешность, для режима A_M не более $18'$;
- напряжение питания 27_{-4}^{+7} В;
- потребляемая мощность не более 6 Вт;
- масса $(6 \pm 0,2)$ кг;
- ресурс 53 000 ч.

Оптическая система прибора (рис. 4.19) состоит из сканирующей системы 15 и двух идентичных оптико-электронных блоков 16, 17, расположенных симметрично относительно оси симметрии сканирующей системы и ее кодового лимба 14. Сканирующая система состоит из пяти оптических элементов (2, 1, 14, 1, 2),

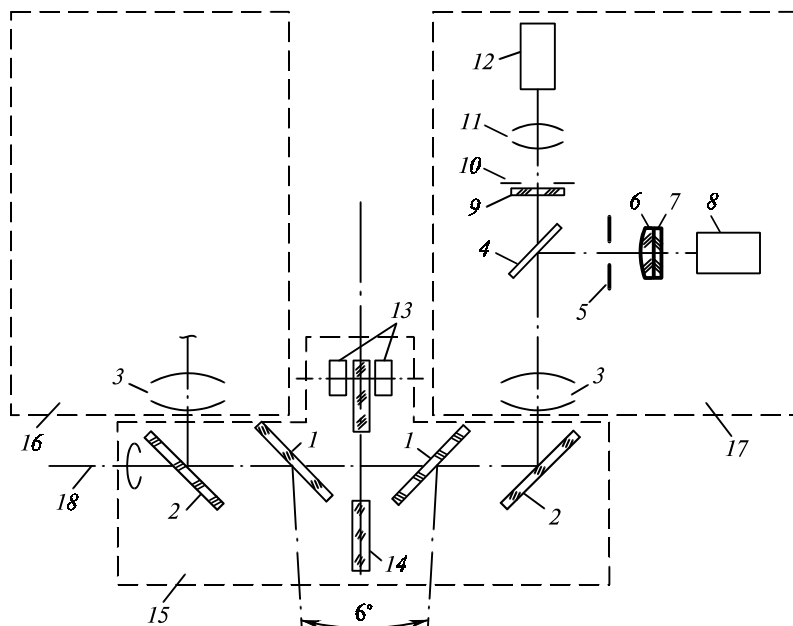


Рис. 4.19. Оптическая система однокоординатного измерителя угла отклонения: 1, 2 — зеркала; 3 — объектив; 4 — светоделитель; 5, 10 — полевые диафрагмы; 6, 11 — конденсоры; 7 — светофильтр; 8, 12 — приемники излучения; 9 — светофильтр; 13 — оптронная пара; 14 — лимб; 15 — сканирующая система; 16, 17 — оптико-электронные блоки; 18 — ось

жестко закрепленных на оси 18, совершающей возвратно-вращательные колебания. В результате визирные линии (углового поля) двух оптико-электронных блоков осуществляют «секущее» сканирование пространства предметов прибора. Угол между этими визирными линиями составляет 6° . Информация об угле поворота сканирующей системы считывается со штриховой дорожки кодового лимба 14 оптронной парой 13, состоящей из светодиода, щелевой диафрагмы и фотодиода. Сканирующая система не герметизирована и работает в открытом космическом пространстве.

Каждый оптико-электронный блок состоит из земного и солнечного каналов. В земной канал входят германиевая линза 3, осуществляющая функции герметизации части прибора, светоделитель 4, полевая диафрагма 5, расположенная в фокальной плоскости линзы 3, конденсор, выполненный в виде плосковыпуклой германиевой линзы 6, на плоской поверхности которой закреплен методом оптического контакта светофильтр 7 из антимоноид индия, и приемник излучения 8. Конденсор 6 проецирует входной зрачок объектива 3 на чувствительную площадку одноэлементного приемника излучения 8. Угловое поле канала круглое диаметром 3° . Спектральный диапазон от 7 до 25 мкм.

В солнечном канале излучение, пройдя элементы 3, 4 и интерференционный светофильтр 9, фокусируется в фокальной плоскости объектива 3, с которой совмещена полевая диафрагма 10. Конденсор 11 проецирует входной зрачок объектива 3 на чувствительную площадку одноэлементного приемника излучения 12. Угловое поле канала, формируемое круглой полевой диафрагмой 10, составляет 4° . Спектральный диапазон канала от 2,6 до 3,3 мкм.

Светоделитель 4 представляет собой кварцевую подложку, на которую нанесен светоделительный слой на основе алюминия. Его пропускание в диапазоне волн от 2 до 3 мкм составляет от 2 до 4%, а отражение для длины волны $\lambda = 11$ мкм не ниже 90%. Низкое пропускание светоделителя (и соответственно высокое отражение) в спектральном диапазоне солнечного канала приводит к появлению в нем серии бликов. Так как светоделитель расположен до полевой диафрагмы 10, то эти блики приводят к уменьшению энергетического зазора между угловыми полями солнечного и земного каналов. Для исключения этого явления реализована оптическая система, описанная в разд. 3.2.1.

Оптическая система прибора, описанная выше, позволяет не только определять угловое положение местной вертикали Земли, но и отстраиваться от Солнца. При попадании Солнца в угловое поле солнечного канала оптико-электронного блока происходит его отключение и включение другого оптико-электронного блока.

Функциональная схема прибора представлена на рис. 4.20, а. В приборе формируются две траектории сканирования (Тр. А и Тр. Б, рис. 4.20, б) двумя идентичными оптическими каналами. Размеры угловых полей и угловое расстояние между траекториями выбраны так, чтобы наблюдаемый диск Земли при сканировании просматривался двумя каналами, а Солнце в случае его расположения вблизи горизонта Земли могло попадать только в один канал.

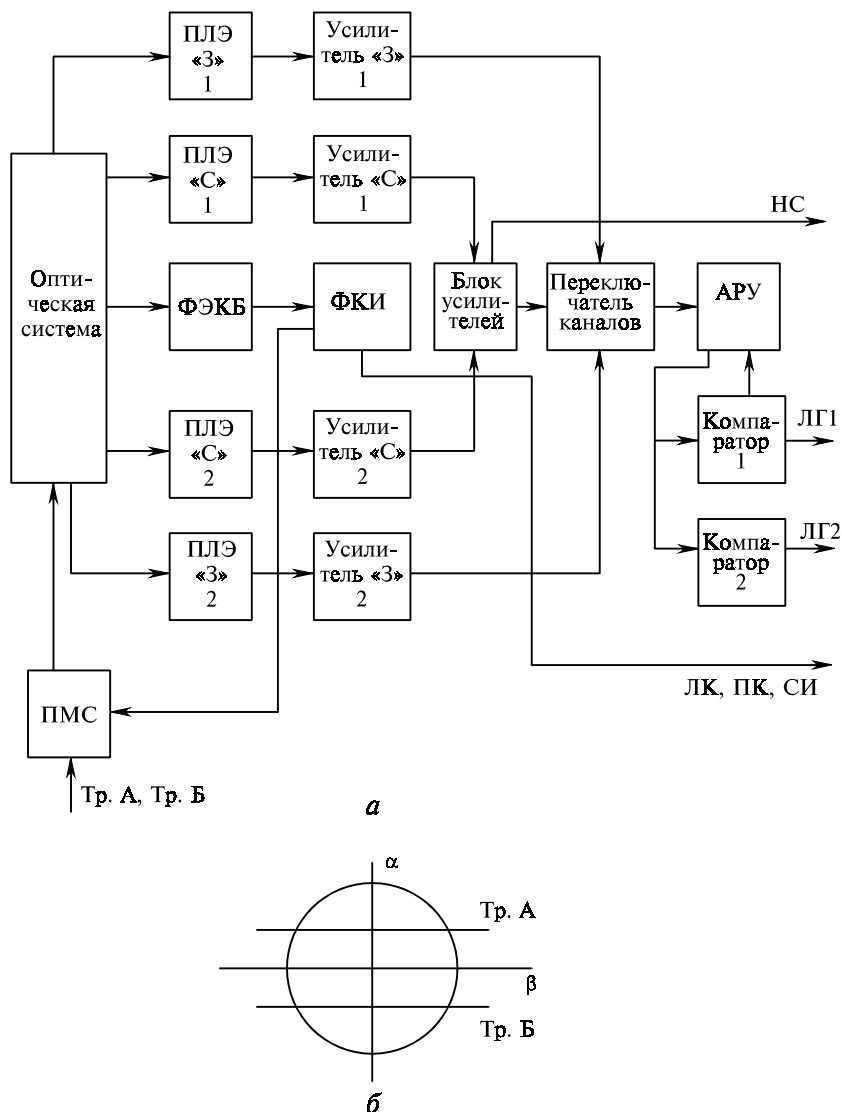


Рис. 4.20. Функциональная схема (а) и траектории сканирования (б) однокоординатного измерителя угла отклонения

Сканирование, как это отмечалось выше, осуществляется колебанием пары сканирующих зеркал, создаваемым механизмом сканирования и его приводом (ПМС). На оси сканирующих зеркал расположен кодирующий диск, на котором нанесены угловые метки с шагом $5'$ и метки, соответствующие началу и концу траектории сканирования (левого и правого края — ЛК и ПК). В процессе сканирования фотоэлектронный кодирующий блок (ФЭКБ) и формирователь кодовых импульсов (ФКИ) на основе этих меток формируют счетные импульсы (СИ) и импульсы левого и правого края, поступающие на выход прибора.

Выбор траектории сканирования производится по внешней команде (Тр. А или Тр. Б). Если выбранная траектория пересекает Землю, то инфракрасное (ИК) излучение последней попадает на приемник лучистой энергии (ПЛЭ) и создает на его выходе электрический сигнал, который через усилитель и переключатель каналов попадает на схему АРУ и далее на два компаратора. Уровень срабатывания (порог) компаратора 1 меньше, чем компаратора 2. По срабатыванию компараторов формируются соответственно импульсы ЛГ1 и ЛГ2, формируемые в моменты пересечения линией визирования прибора горизонта Земли при одном и другом порогах. Эти импульсы также поступают на выход прибора и используются в бортовом вычислителе для определения угла отклонения оси визирования прибора от направления на центр Земли.

Схема АРУ включается и выключается по внешней команде. Принцип действия этой схемы следующий. После срабатывания компаратора 1 от сигнала Земли через фиксированный интервал времени в пределах нарастающего фронта этого сигнала регистрируется его уровень. В зависимости от этого уровня коэффициент передачи схемы АРУ изменяется так, чтобы на ее выходе сигнал в момент регистрации был равен некоторому номинальному. Таким способом поддерживается постоянной крутизна фронта нарастания сигнала Земли на входе компараторов вне зависимости от крутизны фронта входного сигнала. Этим достигается частичная компенсация методической погрешности прибора, связанной с влиянием неравнояркости диска Земли и выражающейся в изменении крутизны фронта сигнала.

Временные диаграммы, поясняющие формирование перечисленных выше сигналов при прямом ходе сканирования (от левого края к правому) представлены на рис. 4.21. В бортовом вычислителе при прямом ходе подсчитывается число счетных импульсов N_1 между ЛК и ЛГ1 и N'_1 между ЛК и ЛГ2. Соответствующие отсчеты на обратном ходе — N_2 и N'_2 . Угол, соответствующий направлению на центр Земли, вычисляется по одной из формул:

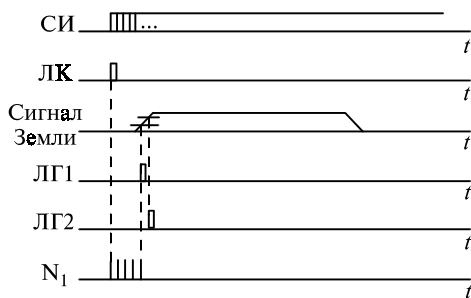


Рис. 4.21. Временные диаграммы, поясняющие формирование сигналов

$$\beta_{\tau} = K \frac{N_1 - N_2}{2}, \quad \beta_{\Gamma} = K \frac{N'_1 - N'_2}{2}.$$

Здесь K — цена дискрета счетных импульсов.

Использовать для вычисления угла β первую или вторую формулу, включать или не включать АРУ, определяется потребителем по результатам набора статистических данных при летных испытаниях конкретных типов КА.

Изложенная логика функционирования прибора относится к случаю, когда в угловое поле прибора не попадает Солнце. При этом с помощью внешней команды может использоваться как траектория А, так и траектория Б. Если же в одну из траекторий попадает Солнце, то по сигналу наличия Солнца (НС) в этом канале блок переключения каналов автоматически подключает к тракту обработки другой канал, не подверженный воздействию Солнца.

Приборы, построенные в соответствии с описанной функциональной схемой, в различных вариантах использовались на различных отечественных КА. В частности, на орбитальной станции «Мир» в составе различных ее модулей были установлены и успешно работали 12 таких приборов. Для геостационарной орбиты была разработана упрощенная модификация приборов этого типа, которые и сегодня работают на некоторых КА.

4.2.4. Двухкоординатные измерители угла отклонения

Состав измерений, выполняемых прибором в схеме секущего сканирования с двумя траекториями (рис. 4.20, б), вполне достаточен для определения угла отклонения оси визирования прибора от вертикали по двум направлениям — вдоль и поперек траекторий. Имея результаты измерений углов, соответствующих четырем точкам пересечения траекторий сканирования с окружностью горизонта Земли N_1, N_2, N_3, N_4 , можно определить угол отклонения оси прибора от направления на центр этой окружности,

как в плоскости сканирования, так и в перпендикулярной к ней плоскости. При этом угол отклонения в плоскости сканирования определяется формулой

$$\beta = K \frac{N_1 - N_2 + N_3 - N_4}{4},$$

где K , как и ранее, цена дискрета измерения, а N_1, N_2, N_3, N_4 — число дискретов.

Угол отклонения α в перпендикулярной плоскости в простейшем случае малых отклонений ($\alpha \leq 2^\circ$) и малого угла между траекториями $2E$ ($E < 5^\circ$) может вычисляться по формуле [53]

$$\alpha = -K \frac{(B - N_1)^2 + (B - N_2)^2}{8E} + K \frac{(B - N_3)^2 + (B - N_4)^2}{8E},$$

где B — угловой размер половины траектории сканирования; E — половина углового расстояния между траекториями. И то, и другое выражено в числе дискретов. В общем случае выражение для α имеет более сложный вид и ввиду громоздкости не приводится.

Оптическая система двухкоординатных измерителей по основным принципиальным моментам аналогична системе однокоординатных с двумя каналами, поэтому не рассматривается. Что касается функциональной схемы, представленной на рис. 4.22, то она существенно упрощена: многие функции выполняются программно в микропроцессоре, входящем в прибор. Функциональная схема включает следующие основные узлы и блоки:

- оптико-механический узел, содержащий объективы O_1, O_2 с приемниками ПЛЭ1, ПЛЭ2; сканирующее зеркало и кодový диск, закрепленные на оси механизма сканирования; три пары фотодиод–светодиод (ФД–СД) для считывания угловых меток с кодového диска;
- блок усилителей сигналов фотоприемников;
- формирователь кодовых импульсов;
- блок привода механизма сканирования;
- цифровой блок обработки сигналов.

Механизм сканирования под управлением блока привода обеспечивает колебательное движение сканирующего зеркала. При этом оси визирования оптических каналов 1 и 2 совершают колебательное движение по траекториям А и Б (рис. 4.20, б). На кодovém диске, закрепленном на валу механизма сканирования, нанесены три вида меток: метки левого (ЛК) и правого (ПК) краев и счетные метки с шагом K ($5'$ или $10'$). Импульсные сигналы меток левого и правого краев, воздействуя через формирователь кодовых импульсов на блок привода механизма сканирования, определяют левую и правую границы траектории

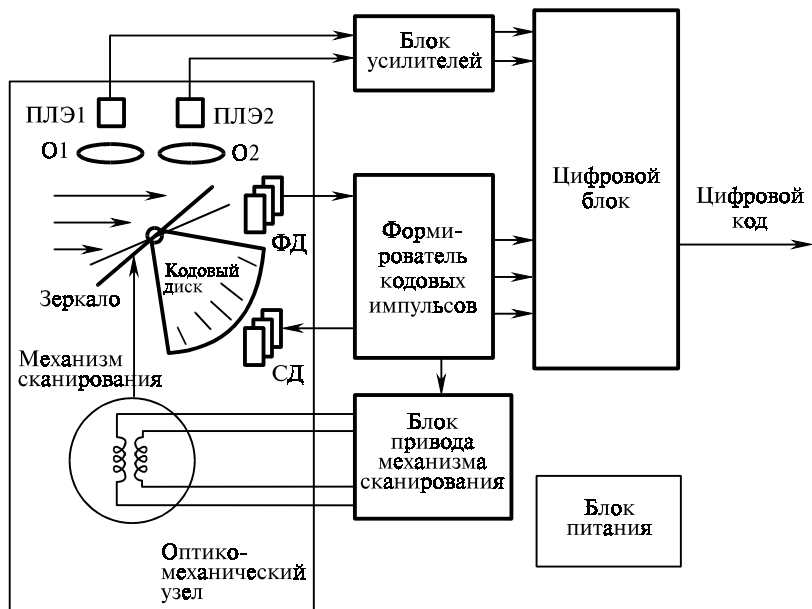


Рис. 4.22. Функциональная схема двухкоординатного измерителя угла отклонения

сканирования. Счетные метки используются в цифровом блоке для отсчета угла поворота лимба.

Сигналы с приемников лучистой энергии ПЛЭ1 и ПЛЭ2 через соответствующие усилители и фильтры, находящиеся в блоке усилителей, поступают в цифровой блок. Полоса пропускания фильтров выбирается таким образом, чтобы, с одной стороны, максимально подавить шумы приемного устройства, а с другой — не допускать сильного искажения фронта сигнала Земли.

Цифровой блок, содержащий программируемый микропроцессор, выполняет основные функции по обработке информации. Для этого аналоговые сигналы, поступающие из блока усилителей, вначале преобразуются в цифровые (двоичный код), а затем подаются в микропроцессор для программной обработки. На программном уровне выполняются следующие функции:

- обнаружение сигналов Земли, Солнца, Луны;
- предварительная селекция сигналов;
- переход в режим измерения;
- измерение угловых координат точки пересечения оси визирования каждого канала с горизонтом Земли;
- формирование массива выходной информации;
- формирование массива вспомогательной информации для последующей диагностики возможных нештатных ситуаций;
- формирование различных технологических режимов.

В качестве основной измерительной информации на выход подается совокупность кодовых импульсов N_1, N_2, N_3, N_4 , соответствующих углам пересечения траектории сканирования с горизонтом Земли. Вычисление углов α и β по приведенным выше формулам производится в бортовой ЦВМ (БЦВМ) КА.

Прибор, описанный выше, относится к новому поколению приборов и имеет следующие основные характеристики:

- диапазон высот полета от 12 000 до 40 000 км;
- предельная погрешность измерения $3,6'$ по углу α , $3'$ по углу β ;
- потребляемая мощность не более 5 Вт;
- масса не более 1,6 кг;
- ресурс 100 000 ч.

Разработана также модификация такого прибора для малых высот (от 180 до 1500 км). Он имеет несколько большую массу (2,5 кг) и погрешность до $5-6'$.

4.2.5. Приборы ориентации по Земле на основе многоэлементных приемников ИК-диапазона

В 1990-х годах электронной промышленностью освоен выпуск неохлаждаемых приемников ИК-диапазона на основе микроболометрических матриц (МБМ), предназначенных прежде всего для тепловидения [60]. Использование таких приемников открывает совершенно новые возможности в проектировании приборов ориентации по Земле, что вызвано несколькими привлекательными свойствами [12].

Прежде всего, удельная пороговая чувствительность (т.е. мощность входного сигнала, при которой отношение сигнал/шум равно 1, приходящаяся на единичную полосу частот и на единицу площади) каждого канала у МБМ-приемников не уступает лучшим образцам существующих одноэлементных приемников. Для сравнения в таблице приведены параметры отечественного приемника МГ32А и МБМ-приемника UL01011 фирмы ULIS (для последнего шумовые параметры относятся к одному пикселю, полоса частот 30 Гц)

Тип приемника	Размер элемента, мм×мм	Количество элементов	Мощность, эквивалентная шуму, Вт	Мощность, эквивалентная шуму в единичной полосе, Вт·Гц ^{-1/2}	Удельная мощность, эквивалентная шуму, Вт·Гц ^{-1/2} ×см ^{-1/2}
МГ32А	1×1	1	$6,5 \cdot 10^{-8}$	$5 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-9}$
UL01011	0,045×0,045	320×240	10^{-10}	$1,8 \cdot 10^{-11}$	$4 \cdot 10^{-9}$

Далее, в отличие от одноэлементных приемников, которые для обзора пространства и формирования соответствующего информационного массива требуют организации оптико-механического сканирования, МБМ-приемники сами формируют такой информационный массив большого объема в собственных пикселях и организуют его электронное считывание.

И, наконец, в системах с одноэлементными приемниками и оптико-механическим сканированием излучение от каждого элементарного участка наблюдаемых предметов воспринимается приемником и всем последующим трактом обработки только в те моменты времени, когда приемник «смотрит» на данный участок, в остальное время излучение этого участка не используется (последовательный поэлементный обзор). В МБМ-приемниках принципиально важно, что конструктивные параметры пикселя, определяющие его тепловую постоянную времени, выбраны такими, чтобы они обеспечивали ее на уровне от 5 до 10 мс. В результате этого энергия падающего излучения накапливается на каждом пикселе в виде тепла в течение 5–10 мс независимо от того, снимается с него сигнал или нет, т.е. осуществляется параллельный обзор пространства. Этим реализуется принцип накопления энергии аналогично тому, как в ПЗС-матрицах — путем накопления фотоэлектронов. Отличие одних от других в том, что в МБМ время накопления фиксировано (равно тепловой постоянной времени пикселя), а в ПЗС-матрицах может изменяться по внешним управляющим сигналам. (Недавно появились сообщения о создании МБМ с временем накопления, регулируемым управляющим сигналом, воздействующим на параметры электрических цепей МБМ [60].) Именно благодаря накоплению энергии МБМ обладает низким уровнем шумов (высокой чувствительностью). Это же обстоятельство вызывает необходимость вести прием сигналов с пикселей и их обработку в том высоком темпе, в котором они генерируются в МБМ, — 5–10 МГц. Это предъявляет серьезные требования по быстродействию к системам обработки, лишь современные высокопроизводительные вычислительные средства способны их реализовать. При увеличении количества пикселей в кадре время накопления может оставаться без изменения, так же как и период смены кадров, при этом, естественно, возрастает темп съема информации с пикселей.

В связи с рассмотренными вопросами представляет интерес остановиться на некоторых многоэлементных приемниках других типов, у которых постоянная времени невелика (десятки и единицы микросекунд или менее). В этих приемниках говорить о накоплении энергии не приходится. С увеличением числа элементов в массиве при сохранении пороговой чувствительности

каждого элемента необходимо увеличить время анализа всего массива пропорционально числу элементов. В этом плане с информационной точки зрения приемники такого типа полностью аналогичны оптико-механическому сканированию одноэлементным приемникам.

Функциональная схема прибора ориентации по Земле, построенного на основе микроболометрической матрицы, представлена на рис. 4.23. Объектив проецирует изображение участка небесной сферы, на котором предполагается нахождение Земли, на чувствительную поверхность МБМ. Угловое поле объектива превышает угловой размер Земли. Блок управления генерирует сигналы, синхронизирующие процесс считывания информации с пикселей матрицы с внешней сеткой частот. Последняя включает как минимум сигналы трех частот: тактовой, соответствующей темпу считывания информации с пикселей, строчной и кадровой. Все они между собой определенным образом сфазированы в соответствии с требованиями по временным соотношениям для конкретного типа матрицы. Сигнал с выхода матрицы, пройдя предварительную аналоговую обработку, заканчивающуюся преобразованием в цифровой код, поступает в цифровой блок. Последний представляет собой специализированный вычислитель достаточно высокой производительности — он должен осуществлять прием информации с пикселей с темпом в несколько мегагерц, запоминать несколько кадров, вести обновление запомненной информации, проводить ее обработку по определенным алгоритмам. На выходе вычислителя формируется цифровой код, в котором содержится информация о наличии или отсутствии Земли в угловом поле, об угловых координатах Земли (если она в угловом поле), о помехах и др.

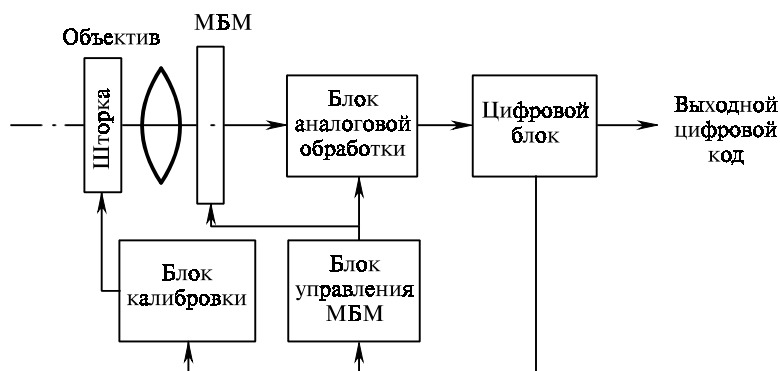


Рис. 4.23. Функциональная схема прибора ориентации по Земле на основе микроболометрического матричного приемника

Принципиальным моментом для такого прибора является необходимость периодической и довольно частой калибровки его чувствительности в полете. Это связано с тем, что мощность теплового излучения от элементов конструкции прибора (фоновое излучения), падающего на пиксели МБМ, существенно превышает мощность сигнала от Земли. Неоднородность чувствительности пикселей, сама по себе не очень значительная (около 10%), приводит к тому, что фоновое излучение порождает помеху, соизмеримую или даже превышающую полезный сигнал. Чтобы работать в таких условиях, необходимо предварительно перед работой по реальной Земле определить с высокой точностью (до долей процента) функцию передачи для каждого пикселя и занести в память вычислителя. Такую процедуру называют калибровкой. При работе по реальной Земле для поступающих с матрицы сигналов необходимо вводить поправки в соответствии с номерами пикселей и хранящимися в памяти данными. Поскольку температура элементов прибора неизбежно меняется в полете, то меняется и мощность фонового излучения и, следовательно, функции передачи пикселей. Поэтому калибровка должна периодически повторяться, чтобы ее результаты соответствовали действующему распределению температур внутри конструкции.

Полетная калибровка выполняется кратковременным введением перекрытия в световую трубку оптической системы переключающейся шторки, которая обеспечивает на МБМ равномерную энергетическую облученность. С этой точки зрения для приборов ориентации по Земле с МБМ целесообразно использовать ИК-объективы с вынесенным вперед входным зрачком, в плоскости которого и должна располагаться переключающаяся шторка.

В цифровом программно выполняются блоке основные функции по обработке сигналов и выделению из них полезной информации:

- поиск и обнаружение сигнала Земли;
- селекция на фоне помех (Солнца, Луны и др.);
- измерение угловых координат центра Земли;
- парирование различных сбойных ситуаций, вызванных непредельными и нештатными ситуациями;
- вспомогательные функции (телеметрирование данных, диагностика, технологические режимы).

Для выполнения перечисленных функций должны быть разработаны соответствующие алгоритмы и программы. Подходы к разработке алгоритмов обработки информации вытекают из принципов, изложенных в гл. 2, конкретные же способы преобра-

зований для того или иного режима, для тех или иных параметров прибора являются предметом дальнейших работ.

Сравнивая принцип построения приборов ориентации по Земле, изложенный в настоящем разделе, с рассмотренными ранее, можно отметить, что использование МБМ позволит улучшить характеристики приборов в следующих направлениях:

- снизить массу и габаритные размеры, исключив оптико-механическое сканирование;
- упростить конструкцию и снизить трудоемкость, уменьшив количество прецизионных оптических и механических деталей;
- повысить точность приборов, используя информацию со всего горизонта Земли, а не с трех-четырех точек, как в приборах секущего типа, и элементы разрешения гораздо меньшего размера.

4.3. Солнечные ОЭП ориентации и навигации КА

4.3.1. Датчики направления на Солнце грубые

Датчики направления на Солнце, позволяющие ориентировать одну из координатных осей КА или его солнечные батареи с точностью в несколько градусов, весьма распространены в практике космических полетов. В качестве примера такого датчика рассмотрим прибор, который в течение многих лет использовался на различных отечественных КА, а на некоторых используется и сегодня.

Прибор формирует сигналы угловой ориентации его оси визирования относительно направления на Солнце в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Соответствующие углы отклонения обозначаются θ и ψ . Угловое поле прибора $(181^{+8}) \times (71^{+4}_{-3})^\circ$. В угловом поле выделяется пять сигнальных зон (рис. 4.24): 1–4 — обзорные зоны, Е — центральная зона наличия, Δ — половина угла перекрытия зон, лежит в пределах от $0,5$ до 5° . Угловой размер зоны Е — 48° . При нахождении Солнца в зонах 1–4, Е прибор выдает соответственно управляющие сигналы наличия Солнца НС1, НС2, НС3, НС4, НСЕ. Каждый сигнал выдается замыканием нормально разомкнутого электронного ключа. Допустимый ток коммутации — от 5 до 85 мА, допустимое напряжение — от 6 до 10 В. При пересечении Солнцем границы зон 1–4 имеет место гистерезис от 5 до $30'$. Напряжение питания прибора 27^{+7}_{-3} В, потребляемая мощность не более 4,2 Вт. Имеется дополнительный обогрев, потребляемая им мощность до 9 Вт, масса прибора не более 2 кг, ресурс 52 000 ч. В приборе содержится три полностью независимых датчика с перечисленными выше параметрами. Благодаря такому резервированию прибор имеет очень высокую надежность. Каждый из трех дат-

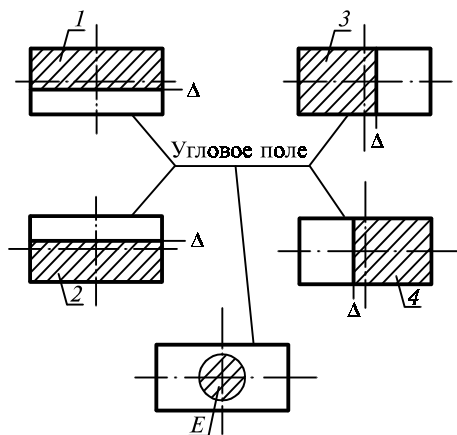


Рис. 4.24. Сигнальные зоны грубого датчика направления на Солнце

чиков имеет весьма насыщенную деталями, но функционально простую оптическую систему. Оптическая система каждого датчика содержит пять оптических каналов:

- оптический канал зоны E с угловым полем, соответствующим сигнальной зоне E;
- два оптических обзорных канала с угловым полем $90^{\circ}30' \times 37^{\circ}30'$;
- два оптических центральных канала с угловым полем $6^{\circ}30' \times 52^{\circ}$; угловые поля центральных каналов образуют крестообразную область со сторонами, направленными вдоль осей поля зрения всего прибора и симметрично по отношению к ним.

Оптический канал зоны E содержит объектив, диафрагму углового поля и приемник излучения — фотодиод. Эти оптические элементы совместно с электрической схемой полностью обеспечивают формирование управляющих сигналов для сигнальной зоны E.

Два оптических обзорных канала и два оптических центральных канала обеспечивают формирование четырех сигнальных обзорных зон. Каждый из двух обзорных каналов имеет два угловых поля $90,5^{\circ} \times 37,5^{\circ}$ (две половины поля сигнальной зоны). Эти два поля формируются одной цилиндрической диафрагмой и двумя чувствительными площадками двухплощадочного фотодиода.

Угловые поля каждого из двух центральных каналов формируются плоской диафрагмой и двумя чувствительными площадками фотодиода.

Кроме перечисленных элементов каждый оптический канал содержит светофильтр и расположенный под ним светодиод, который служит для имитации излучения Солнца при различных проверках.

Формирование управляющих сигналов происходит в электрической схеме каждого из трех датчиков, которая в свою очередь имеет аналоговую и логическую части. Аналоговые части всех оптических каналов идентичны, каждая из них представляет собой усилитель тока, усиливающий ток фотодиода, и пороговое устройство (триггер Шмита) с регулируемым порогом и гистерезисом. Регулируя уровни порогов в разных каналах, выставляют границы зон, величину перекрытия зон и величину гистерезиса. В логической части электрической схемы на основе комбинаторной логики из четырех сигналов оптических обзорных каналов и четырех сигналов оптических центральных каналов формируются управляющие сигналы НС1, НС2, НС3, НС4. При этом сигналы центральных оптических каналов используются для более точного формирования границ сигнальных зон.

Как следует из приведенного описания прибора, выполняемые им функции достаточно просты, в нем отсутствуют механические подвижные элементы. Благодаря этому, а также тройному резервированию прибор обладает высокой надежностью. Однако, так как в нем содержится 15 оптических каналов, более 20 фотоприемных каналов, его изготовление требует весьма высокого технологического уровня производства. Благодаря многим своим положительным качествам, и прежде всего высокой надежности, этот прибор до настоящего времени находит применение на отечественных КА.

В настоящее время разработан современный вариант подобного прибора. В отличие от описанного прибора он формирует аналоговые управляющие сигналы по обеим осям с линейной зоной от -45° до $+45^\circ$ и имеет двойное резервирование. Его основные характеристики:

- размер углового поля $(182 \pm 10) \times (90 \pm 12)^\circ$;
- диапазон изменения управляющих сигналов в линейной зоне от -6 до $+6$ В;
- погрешности формирования управляющих сигналов: смещение начального отсчета не более 0,2 В, погрешность крутизны не более 3%;
- потребляемая мощность не более 3,5 Вт;
- масса не более 0,85 кг;
- ресурс 100 000 ч.

Оптическая система прибора построена на основе щелевой оптики и так же, как в предшествующем приборе, весьма проста. В электрической схеме для формирования линейных управляющих сигналов используются двухплощадочные фотодиоды и операционные усилители, определяющие разность сигналов

с двух площадок. Нормировка по амплитуде выполняется микросхемой аналогового перемножителя. Этот прибор, как и описанный ранее, позволяет ориентировать КА относительно Солнца с точностью в несколько градусов.

4.3.2. Датчики направление на Солнце точные

Приборы этой группы получили распространение в 1970–1980-е годы на различных КА благодаря тому, что в них сочетаются большое поле обзора при поиске Солнца и достаточно высокая точность в режиме измерения. Рассматриваемый ниже вариант такого прибора — пример весьма сложного оптико-электронного устройства, выполняющего большой набор функций и обладающего высокими характеристиками. Он демонстрирует достижения отечественного приборостроения тех лет.

Прибор имеет угловое поле диаметром $(30 \pm 6)^\circ$, в котором выделены 6 сигнальных зон (рис. 4.25):

- А — измерительная зона, ее размер $(3,5 \pm 0,5) \times (3,5 \pm 0,5)^\circ$; в этой зоне формируются управляющие сигналы, несущие информацию об углах отклонения направления на Солнце от оси визирования прибора в двух взаимно перпендикулярных плоскостях;
- Е — центральная часть зоны А, в которой управляющие сигналы меняются линейно; ее размер $(23 \pm 3) \times (23 \pm 3)'$;
- В, С, D, F — обзорные зоны; их конфигурация представлена на рисунке, а размер таков, чтобы обеспечивалось перекрытие между собой и с зоной А не менее $5'$.

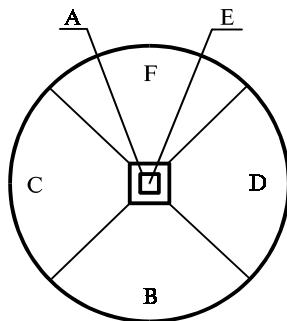


Рис. 4.25. Сигнальные зоны точного датчика направления на Солнце

Угловое поле может разворачиваться с помощью двухступенного карданного подвеса механизма уставок относительно приборной базы в азимутальном направлении (угол α) на углы от 0 до 180° и по углу возвышения (угол β) на углы от -78 до $+78^\circ$. Таким образом, обеспечивается обзор полной полусферы.

Прибор состоит из двух блоков — оптико-механического (масса не более 10,9 кг) и электронного (масса не более 5,1 кг).

Основные параметры прибора:

- предельная погрешность определения направления на Солнце при нулевом управляющем сигнале не более $4'$;
- предельная погрешность крутизны управляющих сигналов в зоне Е не более 10%;
- напряжение питания 27_{-3}^{+7} В;

- потребляемая мощность не более 22 Вт в режиме измерения и автосопровождения; не более 35 Вт в режиме ввода уставок; мощность обогрева не более 12 Вт;
- ресурс прибора не менее 3500 ч.

Прибор работает в следующих режимах: ввод уставок, поиск, измерение, автосопровождение. В режиме ввода уставок в прибор подаются импульсы уставок с частотой до 25 Гц по каждому направлению по отдельной цепи. При этом ось визирования прибора разворачивается шагами на требуемые углы. Шаг уставок 30". Контроль отработки углов разворота производится по ответным импульсам, поступающим из прибора при отработке каждого шага. В режиме поиска из системы управления на шаговые двигатели прибора также поступают импульсы уставок, угловое поле перемещается по некоторой траектории и при попадании Солнца в одну из обзорных зон формируется сигнал наличия Солнца. В режиме измерения Солнце находится в угловом поле прибора, происходит формирование управляющих сигналов и сигналов наличия. В режиме автосопровождения прибор отслеживает изменение положения Солнца при эволюции КА так, чтобы оно всегда находилось в зоне Е.

Прибор выдает во внешние цепи большой набор сигналов, поступающих в систему управления КА, в систему обработки информации, в телеметрическую систему. Основные сигналы, используемые в системе управления, следующие:

- управляющие сигналы в виде постоянного напряжения U'_α , U'_β , изменяющегося в пределах от $-(3,5 \pm 0,5)$ до $+(3,5 \pm 0,5)$ В в зависимости от угла рассогласования; изменение в пределах зоны Е линейное, в остальной части углового поля имеет место насыщение характеристики;
- управляющие сигналы $U'_\alpha \cos \beta$, $U'_\alpha (-\sin \beta)$ — то же, что в предыдущем пункте, но в проекции на оси приборной системы координат;
- сигналы режима поиска $U_\pi \sin \beta$, $U_\pi \cos \beta$, где $U_\pi = (5,6 \pm 0,3)$ В;
- сигналы наличия Солнца: в угловом поле («Наличие СП»), в обзорных зонах («Наличие СО»), в зоне А («Наличие СА»), в зоне Е («Наличие СЕ»).

Эти сигналы выдаются замыканием контактов реле.

Из других сигналов отметим информационные сигналы U_α , U_β , выдаваемые каждый по двум цепям в виде импульсов с время-импульсной модуляцией. По одной цепи задержка импульса относительно опорного с увеличением рассогласования увеличивается, по другой — уменьшается. В результате временной интервал между импульсами в первой и второй цепях пропорцио-

нален углу рассогласования. Такая пара импульсов формируется для рассогласований по углу как α , так и β .

Оптическая система прибора (рис. 4.26) размещается внутри обтекателя — концентрической линзы I , выполняющей функции герметизирующего элемента. Ее внешний радиус 100 мм. Уникальность этой линзы — ее размеры больше полусферы. Изготавливается она по специальной технологии.

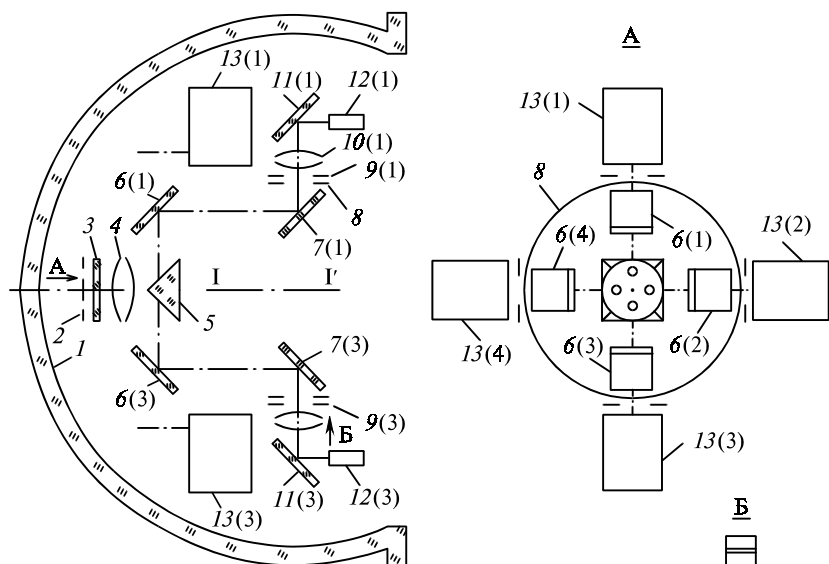


Рис. 4.26. Оптическая система точного датчика направления на Солнце: I — обтекатель (концентрическая линза); 2 — апертурная диафрагма с четырьмя отверстиями; 3 — светофильтр; 4 — объектив; 5 — зеркальная пирамида (призма); 6, 7 — зеркала; 8 — цилиндрический модулятор; 9 — полевая диафрагма; 10 — конденсор; 11 — зеркало; 12 — приемник излучения; 13 — датчик наличия

Оптическая система состоит из пяти каналов. Излучение от Солнца в основном канале последовательно проходит апертурную диафрагму 2 с четырьмя отверстиями, после которой излучение разделяется на четыре пучка лучей, светофильтр 3 и объектив 4. Каждый пучок отражается от соответствующей грани зеркальной пирамиды (призмы) 5, плоских зеркал 6, 7 и фокусируется на поверхности цилиндрического модулятора 8, за которым непосредственно располагается квадратная полевая диафрагма 9. Далее излучение каждого пучка проходит конденсор 10, плоское зеркало 11 и попадает на фотодиод 12. Конденсор 10 формирует изображение отверстия в диафрагме 3 (входной зрачок) на чувствительной площадке фотодиода 12 в виде выходного зрачка. Ось вращения цилиндрического модулятора $I-I'$, проходит через ось цилиндра и ось симметрии оптической системы

(рис. 4.26). На поверхности модулятора нанесены через 60° шесть прозрачных щелей, параллельных оси вращения модулятора (вид Б, рис. 4.26).

Если центр Солнца расположен на визирной линии основного канала, то электрические импульсы, идущие с противоположных фотодиодов ($I2(1)$, $I2(3)$ и $I2(2)$, $I2(4)$), совпадают по времени. Если же центр Солнца смещен относительно визирной линии канала, то появление указанных импульсов с соответствующих пар фотодиодов смещено по времени. В этих временных смещениях и заложена информация об угловых координатах Солнца в угловом поле основного канала.

Помимо основного канала в оптическую систему прибора входят четыре датчика наличия Солнца $I3(1)$, $I3(2)$, $I3(3)$, $I3(4)$ обзорных зон. Оптическая система каждого такого датчика (рис. 4.27) состоит из плоского ломающего зеркала 1 , входного зрачка 2 , объектива 3 , полевой диафрагмы 4 , светофильтра 5 и фоторезистора 6 . Так как входной зрачок 2 расположен перед передним фокусом объектива 3 , то входной зрачок посредством этого объектива оптически сопряжен с чувствительной площадкой фоторезистора 6 . Полевая диафрагма 4 расположена в фокальной плоскости объектива 3 . Перед каждым из восьми приемников излучения установлен источник излучения (на рисунках не показаны). С помощью этих источников осуществляется проверка прибора на функционирование.

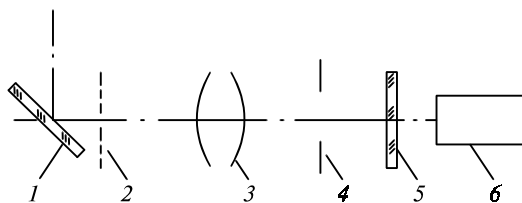


Рис. 4.27. Оптическая система датчика наличия Солнца:

1 — зеркало; 2 — входной зрачок; 3 — объектив; 4 — полевая диафрагма; 5 — светофильтр; 6 — приемник излучения

Конфигурация и расположение угловых полей оптической системы показана на рис. 4.25. Квадрат в центре — это поле основного канала, четыре усеченных сектора — угловые поля датчиков наличия Солнца. Все пять угловых полей имеют небольшое перекрытие.

Оптическая система прибора, расположенная под обтекателем, установлена в двухступенном подвесе, который также размещен под обтекателем. С каждой осью подвеса сопряжен электропривод и датчик меток угла поворота.

Функциональная схема прибора представлена на рис. 4.28. Оптическая система с модулятором и приводом модулятора закреплена в двухступенном карданном подвесе, который позволяет разворачивать ось визирования на требуемые углы с помощью шаговых двигателей (ШД). На оси модулятора закреплен магнитный датчик меток, который используется для стабилизации скорости вращения модулятора и синхронизации работы фотоэлектрического тракта. На осях карданного подвеса размещены вращающие трансформаторы, служащие для формирования управляющих сигналов с функциональной зависимостью от углов уставок. В оптико-механический блок, кроме перечисленных узлов, входят также блок предварительных усилителей и координатор, который формирует аналоговые управляющие сигналы.

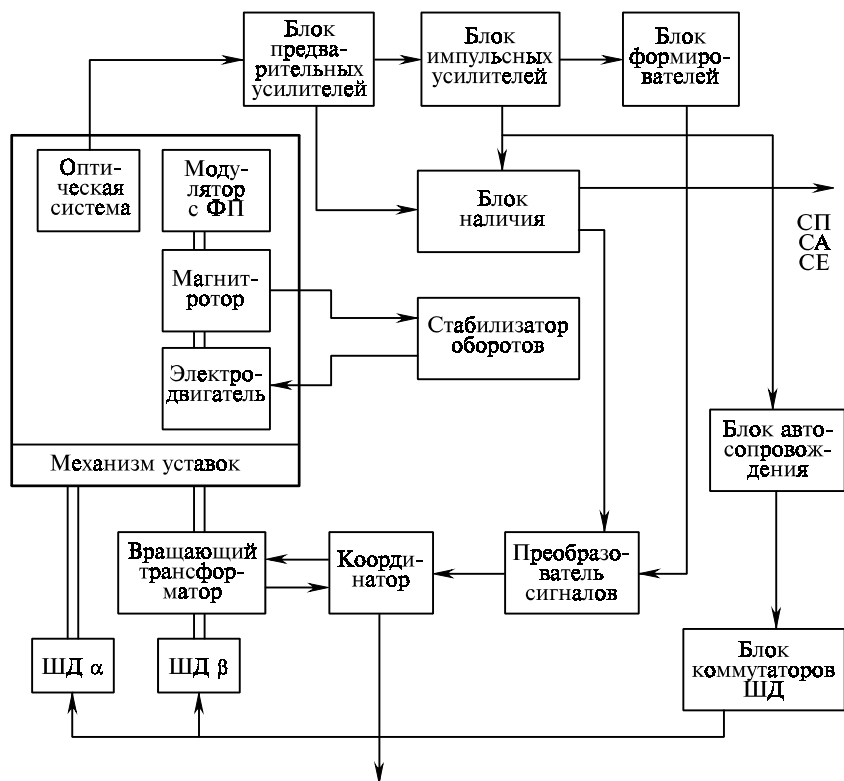


Рис. 4.28. Функциональная схема точного датчика направления на Солнце

Большая часть электронных узлов размещена в электронном блоке. Блок импульсных усилителей из аналоговых видеосигналов фотоприемников формирует короткие импульсы (примерно 5 мкс) в момент пересечения нарастающим фронтом порогового

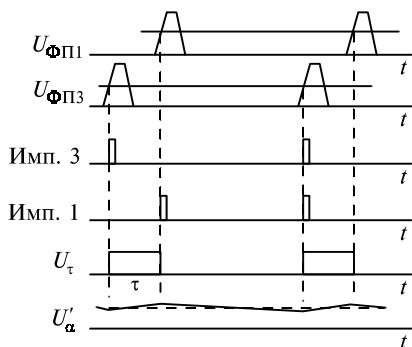


Рис. 4.29. Временные диаграммы формирования управляющих сигналов

уровня, соответствующего половине амплитуды видеосигнала. На рис. 4.29 изображены сигналы только двух фотоприемников $U_{ФП1}$, $U_{ФП3}$, из которых формируется управляющий сигнал U'_{α} . Эти короткие импульсы поступают на выход прибора в качестве информационных сигналов U_{α} , U_{β} , а также в блок формирователей, где из них формируется сигнал U_{τ} с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ).

В преобразователе из ШИМ-сигнала выделяется постоянная составляющая и преобразуется в переменное напряжение с частотой 1 кГц и амплитудой, пропорциональной этой постоянной составляющей. Это переменное напряжение поступает в координатор, где окончательно формируются управляющие сигналы U'_{α} , U'_{β} , $U'_{\alpha} \cos \beta$, $U'_{\alpha}(-\sin \beta)$. В преобразователе к ШИМ-сигналам по схеме суммирования подмешиваются сигналы наличия обзорных зон с тем, чтобы характеристика аналоговых управляющих сигналов охватывала все угловые поля, а не только зону А (за пределами зоны А эта характеристика имеет насыщение).

Блок наличия из импульсов сигналов Солнца, поступающих из блока импульсных усилителей, и из сигналов обзорных зон формирует сигналы наличия Солнца — «Наличие СЕ», «Наличие СА», «Наличие СО», «Наличие СП». Эти сигналы поступают на выход прибора.

Блок коммутаторов ШД коммутирует обмотки ШД в необходимой последовательности по сигналам импульсов уставок. Последние могут поступать либо извне (в режимах ввода уставок и поиска), либо из блока автосопровождения (в режиме автосопровождения). В блоке коммутаторов формируются также ответные импульсы после отработки каждого шага уставок. Включение и отключение режима автосопровождения производится по внешним командам. Блок автосопровождения вырабатывает импульсы уставок, если угол рассогласования превышает пороговое значение (примерно 9°).

Прибор работает следующим образом. В режиме ввода уставок напряжение питания подается на блок коммутаторов ШД, извне поступают импульсы уставок, и ось визирования начинает разворачиваться. Угол разворота контролируется по поступающим из прибора импульсам отработки уставок. По достижении требуемого угла поступление в прибор импульсов уставок пре-

кращается. В режиме поиска включаются все электронные блоки прибора. В прибор поступают импульсы уставок, и ось визирования перемещается по некоторой траектории. При этом выдаются сигналы $U_{\pi} \sin \beta$, $U_{\pi} \cos \beta$. При попадании Солнца в угловое поле формируется сигнал «Наличие СП». В режиме измерения Солнце находится в угловом поле. При этом формируются управляющие сигналы U'_{α} , U'_{β} , $U'_{\alpha} \cos \beta$, $U'_{\alpha} (-\sin \beta)$, а также сигналы U_{α} , U_{β} . В зависимости от того, в какой из зон находится Солнце, формируются сигналы «Наличие СП», «Наличие СО», «Наличие СА», «Наличие СЕ». Если КА относительно направления на Солнце перемещается, то управляющие сигналы и сигналы наличия соответствующим образом изменяются. В режиме автосопровождения при эволюциях КА ось визирования автоматически следит за Солнцем с погрешностью около $10'$.

Описанный прибор в течение многих лет эксплуатировался на отечественных КА. Были разработаны другие варианты приборов подобного класса, отличающиеся размерами сигнальных зон, логикой взаимодействия с системой управления, точностными и габаритно-массовыми характеристиками, также нашедшие применение на многих КА.

4.3.3. Измерители угловых координат Солнца грубые

Одним из основных требований к приборам ориентации по Солнцу всегда было сочетание большого поля обзора в режиме поиска и необходимой точности в режиме измерений. В датчиках направления на Солнце, рассмотренных в предшествующих разделах, такое сочетание достигается использованием в каждом режиме отдельных оптических каналов (обзорных и измерительного) и механизма уставок, разворачивающего зону измерений в требуемом направлении. В измерителях угловых координат это достигается либо постоянным сканированием большого поля обзора (сканирующие приборы), либо использованием многоэлементных приемников (статические приборы). В настоящем разделе рассмотрен один из первых отечественных статических приборов, разработанный в 1970-х годах на основе многоэлементного приемника с кодовой маской. Уровень электронной технологии тех лет позволял изготовить приемник с не очень большим числом элементов, поэтому на этом принципе можно было создать лишь грубые приборы.

Принцип действия прибора основан на использовании щелевой оптики и кодовой маски (рис. 4.30). Излучение Солнца падает на плоскую диафрагму со щелью под углом α , который измеряется в плоскости, перпендикулярной плоскости диафрагмы и направлению щели. За диафрагмой расположен фоторезисторный многоплощадочный приемник с кодовой маской. Кодовая

маска соответствует шестиразрядному коду Грэя и содержит дополнительный разряд, подтверждающий наличие излучения Солнца на данном приемнике. Узкий световой штрих, сформированный диафрагмой, подсвечивает дорожки кодовой маски, так что на выходе приемника образуется параллельный шестиразрядный цифровой код Грэя и сигнал наличия Солнца. Угловое поле такого приемника $48 \times 96^\circ$, меньшая сторона соответствует направлению изменения угла α . При изменении угла α значение цифрового кода меняется.

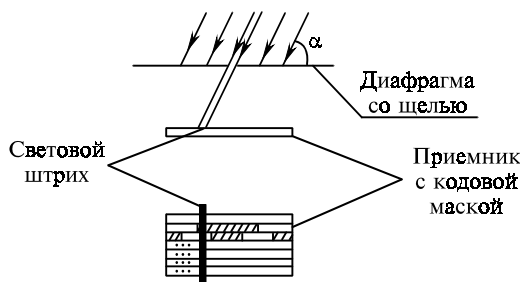


Рис. 4.30. Принцип действия измерителя угловых координат Солнца с кодовой маской

Два приемника, совмещенные так, что один является продолжением другого в направлении α , образуют измерительную пару. Две измерительные пары составляют оптическую головку (ОГ). Направление щелей двух измерительных пар развернуты одно относительно другого на 90° , параллельны соответственно осям X и Y базовой системы координат оптической головки. Угловое поле оптической головки $92 \times 92^\circ$. Она формирует 14-разрядный цифровой код (7 разрядов для оси X , 7 — для оси Y). В прибор входит шесть таких головок, тем самым обеспечивается просмотр всей небесной сферы, а также электронный блок и соединительная коробка.

Основные параметры прибора следующие:

- поле обзора — полная сфера;
- масса не более 10 кг;
- напряжение питания 28_{-5}^{+6} В;
- потребляемая мощность 5 Вт без засветки Солнцем и 7 Вт с засветкой Солнцем;
- выходные сигналы — цифровой параллельный код с дискретностью 1° ;
- погрешность «привязки» границы смены кода к приборной системе координат не более $0,5^\circ$.

Структурно-функциональная схема прибора представлена на рис. 4.31. Оптическая головка формирует цифровой код двух угловых координат Солнца в ее собственной приборной системе координат и сигналы наличия Солнца на ее фотоприемниках. Цифровые коды всех оптических головок поступают в электронный блок через соединительную коробку, при этом одноименные разряды кодов угловых координат всех головок объединены, сигналы наличия поступают раздельно. Анализатор наличия в электронном блоке определяет номер рабочей головки, в угловом поле которой находится Солнце. Если Солнце находится в угловом поле нескольких головок (двух или трех), то за рабочую принимается та, приоритет которой выше (приоритет головок устанавливается заранее). Напряжение питания подается в измерительные цепи только рабочей головки через коммутатор. Информация о номере рабочей головки поступает в шифратор, который вырабатывает соответствующий код головки. В формирователе выходного кода этот код головки объединяется с угловыми кодами и поступает на выход прибора через соединительную коробку. В приборе имеются также блок питания и блок телеметрии, которые на схеме не показаны.

Прибор, построенный на основе описанного принципа, успешно использовался на некоторых отечественных КА в 1970–1980-е годы. К грубым измерителям угловых координат Солнца с некоторыми оговорками может быть отнесен и современный

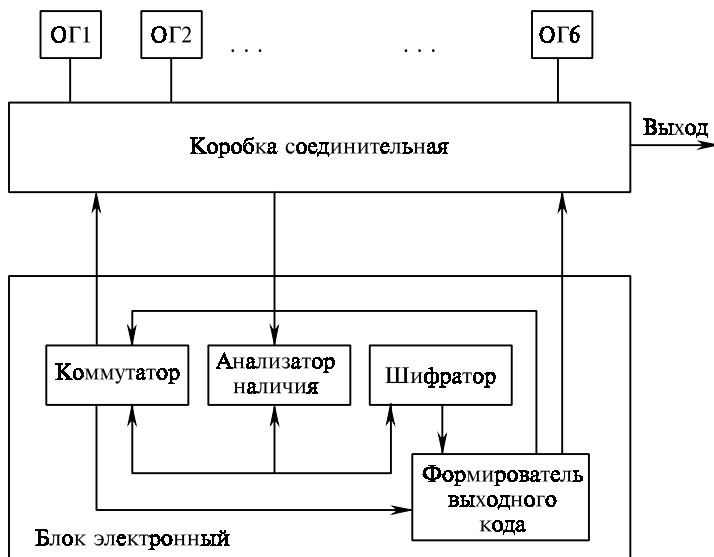


Рис. 4.31. Структурно-функциональная схема измерителя угловых координат Солнца с кодовой маской

прибор, характеристики которого приведены в конце разд. 4.3.1. Этот прибор во всем своем угловом поле $182 \times 90^\circ$, строго говоря, является датчиком наличия Солнца, однако в поле $90 \times 90^\circ$ он выполняет функции измерителя угловых координат, формируя аналоговые управляющие сигналы.

4.3.4. Измерители угловых координат Солнца точные

Сканирующие точные измерители угловых координат Солнца

В конце 1970-х годов было предложено простое и оригинальное техническое решение, позволившее создать весьма малогабаритный прибор ориентации по Солнцу, обладающий большим полем обзора и высокой точностью определения угловых координат Солнца во всем поле обзора. Суть этого решения состоит в том, что организуется круговое сканирование пространства щелевым V-образным растром и синхронно с ним формирование точных кодовых меток угла поворота. В результате, регистрируя угол поворота в момент визирования Солнца щелями V-растра, получают кодовые отсчеты N_1 и N_2 , которые по известным формулам могут быть пересчитаны в углы азимута α и возвышения β в приборной системе координат [15]:

$$\alpha = N_1 \delta + \frac{N_2 \delta}{2} - A_0, \quad \beta = \arctg \left[\operatorname{ctg} \varphi \sin \frac{N_2 \delta - B_0}{2} \right],$$

где: N_1 — отсчет угла поворота сканера в момент визирования Солнца первой щелью; N_2 — отсчет угла поворота между моментами визирования Солнца первой и второй щелями; δ — цена дискрета при отсчете углов в угловой мере; A_0 , B_0 — постоянные коэффициенты, соответствующие сдвигу нулей отсчета датчика угла поворота относительно приборной системы координат; φ — половина угла между щелями V-растра.

Приборы, построенные на основе этого технического решения, достаточно подробно описаны в [15, 67, 68]. Поэтому приведем лишь краткое описание оптической системы и перечислим основные характеристики двух модификаций, получивших наиболее широкое распространение на отечественных КА.

Малогабаритная оптическая система широкопольного прибора ориентации по Солнцу с двумя подвижными линиями визирования (рис. 4.32) содержит неподвижный приемник излучения 6, вращающийся оптический блок 7 и фотоэлектрический датчик угла поворота 5. Оптический блок состоит из двух щелевых диафрагм 1(1), 1(2) (на рисунке не показана), нанесенных на цилиндрические линзы 2(1), 2(2), concentричные двум диафрагмам на оптических элементах со сферическими отражательными поверхностями 3(1), 3(3). Эти элементы установлены на входе цилиндрического световода 4 заданной длины, выход которого

оформлен в виде конуса. Общая плоскость симметрии цилиндрических линз с щелевыми диафрагмами повернута относительно оси вращения блока на угол φ . Благодаря этому в пространстве предметов прибора его мгновенное поле формируется в виде V-образной пары щелей, которая производит сканирование Солнца в угловом поле прибора (рис. 4.33), имеющем вид кольца с размерами $360 \times 100^\circ$. На практике при размещении этого прибора на КА неподвижные шторки, устанавливаемые на корпусе δ , формируют необходимое угловое поле.

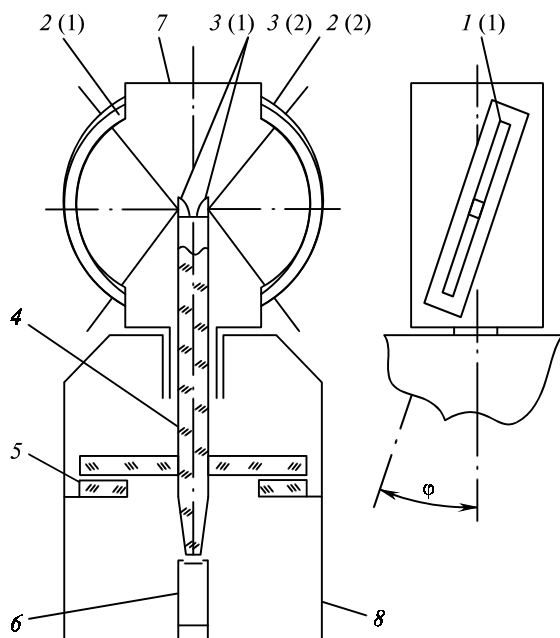


Рис. 4.32. Оптическая система сканирующего точного измерителя угловых координат Солнца:

1 — щелевая диафрагма; 2 — цилиндрическая линза; 3 — оптический элемент со сферической отражательной поверхностью; 4 — цилиндрический световод; 5 — датчик угла поворота; 6 — приемник излучения; 7 — вращающийся оптический блок; 8 — корпус

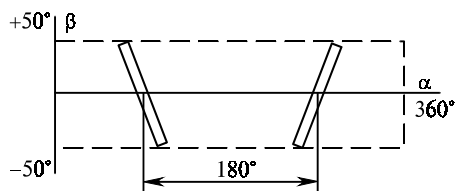


Рис. 4.33. Угловое поле солнечного прибора с V-образным растром

Определение угловых координат Солнца производится по сигналам с приемника излучения и датчика угла поворота на основе известного алгоритма. Характеристики импульса сигнала с приемника во многом определяются количеством отражений лучей от Солнца внутри световода, которое существенно зависит от расположения Солнца вдоль мгновенного поля. Неизменность указанных характеристик импульсов, необходимая для точности прибора, обеспечена рациональным выбором соотношений конструктивных параметров световода с оптическими элементами и нанесения фильтра переменной плотности на цилиндрические линзы.

Сбоку между выходным торцом световода и чувствительной площадкой приемника установлен светодиод (на рис. 4.32 не показан). С помощью этого светодиода проводится проверка прибора на функционирование.

Основные характеристики варианта прибора, широко применявшегося на многих КА с большим сроком активного существования (в том числе на орбитальной станции «Мир») следующие:

- поле обзора $360 \times 92^\circ$;
- предельная погрешность $3'$;
- масса не более 3,3 кг (оптико-механический и электронный блок);
- ресурс 33 000 ч в течение 15 лет работы на орбите;
- напряжение питания 27^{+7}_{-4} В;
- потребляемая мощность не более 9,5 Вт.

Последняя модификация этого прибора, используемая на новых отечественных КА, в том числе на КА системы «Глонасс», претерпела значительные изменения. Применение элементной базы высокой степени интеграции позволило существенно уменьшить габаритные размеры электронных узлов при одновременном расширении объема выполняемых функций, исключить электронный блок. Многие функции по обработке информации выполняются программно в микропроцессорной вычислительной системе, введенной в состав прибора. Благодаря паспортизации систематических составляющих погрешности и применению специальных технологических приемов стабилизации конструкции удалось втрое снизить погрешности прибора. В результате основные характеристики прибора следующие:

- поле обзора $180 \times 90^\circ$;
- предельная погрешность не более $1'$;
- масса не более 1,6 кг;
- ресурс 100 000 ч;
- потребляемая мощность не более 4,5 Вт.

Статические точные измерители угловых координат Солнца

Успехи, достигнутые в фотоприемной технике в конце прошлого столетия, позволили сделать новый качественный шаг в разработке астроприборов. Освоение электронной промышленностью производства многоэлементных приемников на основе ПЗС-линеек и ПЗС-матриц создало базу для разработки статических высокоточных приборов ориентации по Солнцу без механически перемещающихся элементов. Хотя сканирующие приборы достигли высокой степени совершенства, в том числе и по точности, надежности, долговечности, однако получить высокие характеристики в них удалось с большими трудозатратами на изготовление прецизионных оптических и механических узлов. В этом плане технология сборки электронных узлов существенно проще, лучше поддается автоматизации, больше приспособлена к современному производству. В дополнение к этому исключение механических сканирующих устройств позволяет улучшить габаритно-массовые характеристики приборов.

В приборах ориентации по Солнцу статического типа могут использоваться многоэлементные приемники, как линейные, так и матричные. Оптические системы для обоих случаев отличаются мало: и там, и там это щелевая оптика, в первом случае — различные варианты V-растров, во втором — камера-обскура. Темп поступления информации с матричного приемника на два-три порядка выше, чем с линейного, во столько же раз больше объем первичной информации для обработки. Это влечет за собой для матричного приемника необходимость использования вычислительных средств большей производительности, с большей емкостью памяти, а это в свою очередь приводит к увеличению потребляемой мощности, габаритных размеров и массы.

При использовании линейного приемника существенную часть обработки информации удастся выполнить на уровне оптического сигнала. Поскольку в приборах ориентации по Солнцу нет проблемы с мощностью сигнала, с помощью V-растра достаточно просто реализуется сжатие информации (редукция) — преобразование двумерного оптического изображения в одномерное распределение освещенности на линейном приемнике без потери полезной информации. Линейный приемник только преобразует этот редуцированный процесс в последовательность электрических импульсов. В результате объем поступающей в процессор информации и темп ее поступления значительно меньше, чем для матричного приемника. В случае матричного приемника никакого сжатия информации в оптико-фотоприемном тракте не происходит: оптическая система осуществляет подобное преобразование изображения, матричный фотоприемник выполняет

двойную функцию: разложение двумерного изображения в одномерный процесс и преобразование оптического сигнала в электронный; все функции по обработке информации ложатся на вычислительную систему, что значительно ее усложняет. Возможно, в будущем, когда темп приема и обработки информации на уровне десятков мегагерц и объемы памяти порядка нескольких мегабайт в космических приборах не будут сопряжены со значительными затратами габаритных размеров, массы, потребляемой мощности, приведенные соображения могут быть пересмотрены.

Как в нашей стране, так и за рубежом предложено много вариантов приборов ориентации по Солнцу, использующих ПЗС-линейки, некоторые из них описаны в литературе (например, [3, 21, 79]). Многочисленные вопросы, связанные с созданием таких приборов, весьма подробно рассмотрены в монографии [67]. Поэтому здесь изложим лишь принцип построения таких приборов и приведем основные характеристики.

Схема измерения приборов ориентации по Солнцу с ПЗС-линейкой основана на использовании щелевого V-образного растра или его разновидностей (V-растр с кратными щелями, N-растр и др.). ПЗС-линейка размещается за плоской диафрагмой параллельно ей. В диафрагме прорезаны в простейшем случае две щели под углом друг к другу. Излучение Солнца, проходя через щели, создает на ПЗС-линейке изображения этих щелей в виде световых штрихов (рис. 4.34). Координаты двух точек пересечения этих штрихов с ПЗС-линейкой x_1 и x_2 характеризуют углы отклонения α и β направления на Солнце от оси OZ соответственно в плоскости XOZ и в плоскости YOZ (на рис. 4.34 ось OZ направлена по нормали к плоскости чертежа и совпадает с нормалью к плоскости диафрагмы). При малых отклонениях имеет место линейная зависимость α от $x_1 + x_2$ и β от $x_1 - x_2$; в общем случае эти зависимости существенно нелинейны и взаимосвязаны. Для реальных ситуаций характер этих зависимостей еще более усложняется из-за необходимости учета разнородных оптических сред (воздух, стекло, вакуум) на пути распространения излучения [67]. Поэтому рекомендуемый для практики способ учета этих зависимостей — экспериментальное их определение на готовом приборе, паспортизация и последующее введение в алгоритм обработки информации прибора.

Функционально прибор ориентации по Солнцу с ПЗС-линейкой выглядит достаточно просто. Он включает оптическую систему в виде щелевого растра со светофильтром и приемника (ПЗС-линейки), узел управления линейкой, узел предварительной обработки сигнала и вычислитель. В узле вычислителя программно выполняются основные функции по обработке сигналов:

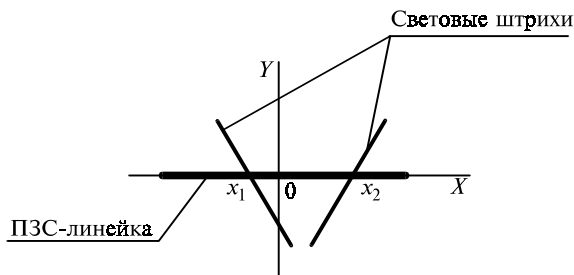


Рис. 4.34. Изображение V-растра в плоскости ПЗС-линейки

- выделение сигнала Солнца на фоне всевозможных помех (световых, электрических и др.);
- учет неоднородности чувствительности пикселей ПЗС-линейки;
- учет искажений сигнала Солнца из-за возможных дефектов растра, стекла, загрязнения и т.п.;
- точное вычисление координат изображения штрихов на ПЗС-линейке;
- учет паспортизованных зависимостей измеряемых углов от координат штрихов на ПЗС-линейке;
- организация взаимодействия процессора с ПЗС-линейкой и другими возможными источниками информации в приборе (датчики температуры, напряжения и т.п.);
- формирование массива контрольной информации;
- организация взаимодействия по внешнему интерфейсу.

Прибор выдает информацию в систему управления КА в цифровом виде по интерфейсу ГОСТ 26 765.52–87. Основные характеристики варианта прибора, описанного в [3]:

- угловое поле $120 \times 60^\circ$;
- погрешность (случайная составляющая) не более $3'$;
- масса не более 600 г;
- потребляемая мощность 2 Вт.

К сожалению, отсутствует достоверная информация о полной предельной погрешности этого прибора, о ее медленноменяющейся составляющей. Это вызвано трудностями в измерении этих погрешностей, необходимостью иметь высокоточное стабильное метрологическое оборудование для их достоверного определения.

Отечественные приборы, построенные по изложенному принципу на зарубежной элементной базе, используются на КА «Ямал-100», «Ямал-200» и некоторых других [3, 21]. Создание таких приборов на отечественной элементной базе — дело ближайшего будущего.

4.4. Земные ОЭП ориентации и навигации КА видимого диапазона

Приборы ориентации по Земле видимого диапазона не получили широкого распространения ввиду их серьезного недостатка — ограничения по времени работы из-за изменения для наблюдателя условий освещения Земли Солнцем вплоть до полного отсутствия такого освещения. Особенно это ограничение сказывается на низких орбитах, где доля нерабочего времени доходит до половины. Для высоких орбит эта доля меньше (для геостационарной орбиты — около 10%), тем не менее это ограничение вынуждает предусматривать на КА дополнительные резервные средства ориентации. Поэтому использование земных ОЭП видимого диапазона оказывается оправданным лишь в отдельных специальных случаях и в основном на высоких орбитах.

Основное достоинство земных приборов видимого диапазона по сравнению с приборами ИК-диапазона — значительно лучшие энергетические соотношения сигналов и помех и вытекающие из этого более простые способы достижения высокой точности измерений. Первые приборы этого типа создавались на основе принципа механического сканирования, в качестве фотоприемников использовались фотодиоды. Один из подобных приборов, имевший наиболее длительный жизненный цикл и находящийся в эксплуатации с конца 1970-х годов до начала текущего столетия, рассмотрим ниже.

Принцип действия прибора основан на периодическом сканировании пространства по направлениям трех пересекающихся лучей тремя щелями-анализаторами, регистрации моментов касания щелями внешней границы освещенного серпа Земли и последующем вычислении угловых координат центра Земли по определенному алгоритму (рис. 4.35). На рисунке цифрами 1, 2, 3 отмечены стрелки, указывающие направление сканирования освещенного серпа Земли и соответствующие сканирующие щели, OY_{Π} , OZ_{Π} — оси подвижной системы координат, связанной с механизмом сканирования.

Сигнальные зоны выдачи информации представлены на рис. 4.36. Зона А — зона наличия и грубого измерения, размер которой

$$2^{\circ}20' \times 2A,$$

$$\text{где } A = \begin{cases} \rho - 6^{\circ}2', & \rho < 9^{\circ}, \\ 11^{\circ}35' - \rho, & \rho > 9^{\circ}, \end{cases}$$

ρ — угловой радиус Земли.

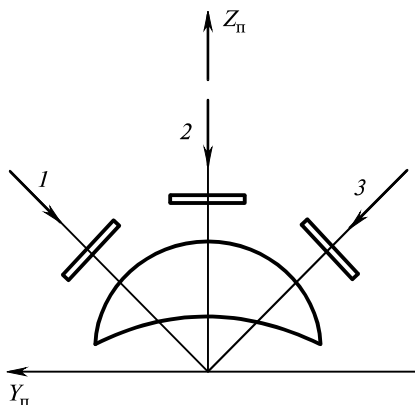


Рис. 4.35. К пояснению принципа действия земного прибора видимого диапазона

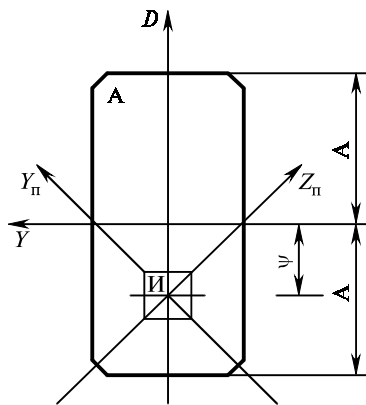


Рис. 4.36. Сигнальные зоны углового поля прибора ориентации по Земле видимого диапазона и оси координат

При нахождении центра Земли в этой зоне прибор выдает сигнал наличия Земли и формирует аналоговые управляющие сигналы. Зона И — зона точных измерений, размер которой $40 \times 40'$. При нахождении центра Земли в зоне точных измерений прибор выдает импульсные управляющие сигналы точного измерения. С помощью системы уставок оси подвижной системы координат $Z_п O Y_п$ могут разворачиваться относительно осей неподвижной системы координат $Z O Y$ на угол α . Это делается, чтобы обеспечить симметричное положение серпа Земли относительно осей подвижной системы координат и направлений сканирования при изменении положения КА относительно освещенного серпа Земли. Предусмотрена также возможность смещения зоны точных измерений относительно начала неподвижной системы координат (установка по углу ψ). Цель этого — обеспечить работу прибора при изменении углового радиуса Земли, связанном с изменением высоты полета.

Прибор состоит из оптического и электронного блоков, бленды с крышкой, имеет полное резервирование всех электронных узлов.

Основные параметры прибора:

- диапазон высот от 30 000 до 40 000 км ($\rho = 7^\circ 44' - 10^\circ 05'$);
- диапазон углов Солнце–объект–Земля от 20 до 180° ;
- размер зоны наличия и грубых измерений $2^\circ 20' \times 2A$;
- размер зоны точных измерений $40 \times 40'$;
- погрешность при нулевых управляющих сигналах (аналоговых) не более $4'45''$;
- погрешность крутизны характеристики аналоговых управляющих сигналов в зоне от $-13'$ до $+13'$ не более 25%;

- диапазон изменения аналоговых управляющих сигналов от $-3,6$ В до $+3,6$ В;
- погрешность определения направления на центр Земли по импульсным управляющим сигналам в зоне точных измерений не более $3'$;
- частота выдачи информации 20 Гц;
- масса не более 23,2 кг;
- напряжение питания 27_{-3}^{+7} В;
- потребляемая мощность не более 20 Вт;
- ресурс 5800 ч;
- диапазон уставок по углу α от -217° до $+34^\circ$;
- диапазон уставок по углу ψ от $-1^\circ 20'$ до $+1^\circ 20'$;
- шаг уставок $30''$;
- частота ввода уставок до 25 Гц.

Прибор работает в следующих режимах:

- режим ввода уставок по α и ψ : производится подача в прибор импульсов уставок с частотой 25 Гц, по ответным импульсам осуществляется контроль отработки уставок;
- информационный режим: формируются сигнал наличия Земли (в случае попадания ее в угловое поле) и аналоговые управляющие сигналы; для компенсации орбитальной скорости движения КА могут вводиться уставки по углу α с частотой до 2,5 Гц;
- режим измерения: центр Земли находится в зоне точных измерений, выдаются сигнал наличия Земли и импульсные управляющие сигналы; так же, как в информационном режиме, предусматривается возможность ввода уставок с частотой до 2,5 Гц.

Импульсные сигналы, которые выдает прибор в режиме точных измерений, представляют собой серию из 6 импульсов «0», «1», «2», «3», «4», «5». Длительность каждого импульса в пределах от 4 до 25 мкс, амплитуда от 2 до 3,5 В, частота соответствует частоте сканирования (около 20 Гц). Импульсы выдаются по отдельным цепям.

Импульс «0» — тактовый, дает разрешение абоненту на прием информации прибора; его положение во времени предшествует появлению сигналов в угловом поле.

Импульс «5» формируется при рабочем ходе щели в момент нахождения ее за $30'$ до начала углового поля; от импульса «5» начинается отсчет «мерного интервала» для нормировки положения импульсов сигнала.

Импульс «4» формируется в момент пересечения щелью визирной оси оптических каналов; этим импульсом заканчивается отсчет «мерного интервала».

Импульсы «1», «2», «3» формируются при пересечении соответствующей щелью внешнего края серпа Земли; их положение во времени несет информацию об углах рассогласования между направлением на центр Земли и осью X прибора. Импульсы «1», «2», «3» могут появляться в любой очередности. Угловые рассогласования определяются в системе управления КА по следующим формулам (для подвижной системы координат):

$$Y_{\Pi} = \frac{A}{2f' \sin \gamma} \left[(t_{51} - t_{52}) + (t_{52} - t_{53}) \right] \frac{K_0}{t_{54}},$$

$$Z_{\Pi} = \frac{A}{2f'(1 - \cos \gamma)} \left[(t_{51} - t_{52}) - (t_{52} - t_{53}) \right] \frac{K_0}{t_{54}},$$

где t_{51} — временной интервал между импульсом «5» и импульсом « i », $i = 1, 2, 3, 4$; A — угол, соответствующий перемещению щелей между моментами появления импульсов «5» и «4» («мерному интервалу»); K_0 — масштабный коэффициент; f' — фокусное расстояние объективов; $\gamma = 45^\circ$ — угол наклона траекторий движения щелей 1 и 3 по отношению к траектории щели 2.

Аналоговые управляющие сигналы прибор выдает относительно неподвижной системы координат с учетом углов уставок. В линейной зоне связь между угловыми рассогласованиями Y_{Π} , Z_{Π} и соответствующими им значениями в неподвижной системе координат определяется соотношениями

$$Y_{\Pi} = Y_{\Pi} \cos \alpha - Z_{\Pi} \sin \alpha,$$

$$Z_{\Pi} = Z_{\Pi} \cos \alpha + Y_{\Pi} \sin \alpha + \psi,$$

где α , ψ — углы уставок.

Оптическая система прибора содержит три одинаковых основных канала, с помощью которых в пространстве предметов осуществляется раздельное сканирование освещенного Солнцем серпа Земли мгновенными щелевыми угловыми полями каналов, как это показано на рис. 4.35. С помощью элементов оптической системы это радиальное сканирование преобразуется в плоскости анализа прибора в линейное.

Оптическая система имеет одну бленду и одно герметизирующее защитное стекло, за которым располагаются основные каналы, на входе каждого установлена визирующая куб-призма (рис. 4.37). Каждая куб-призма установлена подвижно с возможностью вращения относительно оси, параллельной ее рабочим граням. Средний основной канал (рис. 4.38) состоит из визирующей куб-призмы 3, объектива 4, призмы Пехана 5, ромб-призмы 6, полевой диафрагмы 7, единого для всех трех каналов щелевого модулятора 8, конденсора 9 и фотодиода 10.

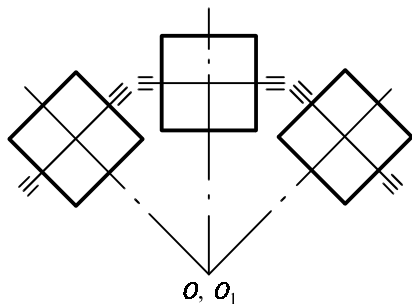


Рис. 4.37. Расположение трех входных призм визирующих каналов прибора

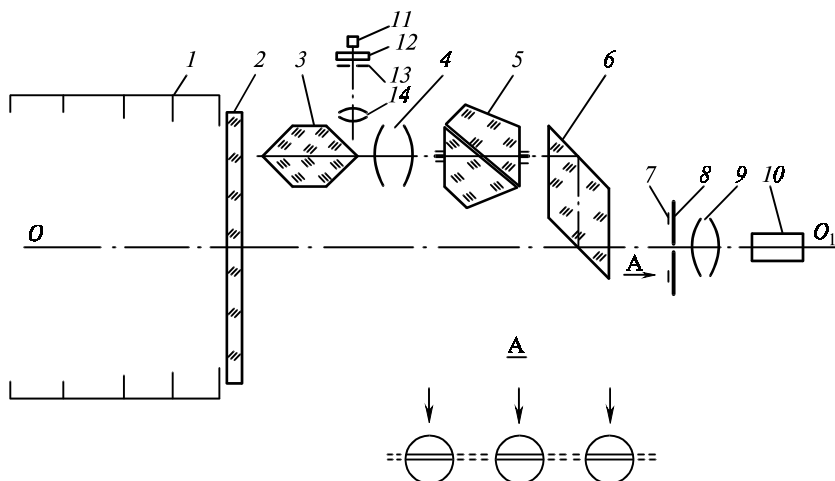


Рис. 4.38. Оптическая система центрального канала:

1 — бленда; 2 — защитное стекло; 3 — куб-призма; 4 — объектив; 5 — призма Пехана; 6 — ромб-призма; 7 — полевая диафрагма; 8 — щелевая диафрагма (модулятор); 9 — конденсор; 10 — приемник излучения; 11 — светодиод; 12 — матовая пластина; 13 — щелевая диафрагма; 14 — объектив

Боковые каналы отличаются друг от друга и от среднего канала несколько другим пространственным положением визирных призм, призм Пехана и ромб-призм. С помощью куб-призмы осуществляется уставка угловых полей прибора в радиальном направлении (рис. 4.39). В рабочем положении куб-призма визирные линии основных каналов располагаются на конической поверхности, ось симметрии которой совпадает с осью OO_1 (рис. 4.38). Объектив 4 осуществляет фокусировку изображения части светящегося серпа Земли в плоскости полевой диафрагмы 7 и соответственно в плоскости щелевой диафрагмы 8. Посредством призм Пехана 5, оси вращения которых совпадают с оптической осью объектива, осуществляют поворот изображения в каждом канале. В результате прямолинейное сканирование

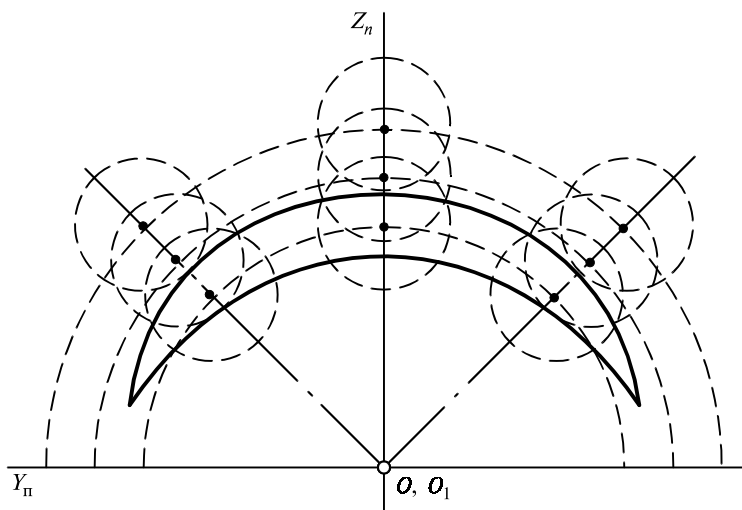


Рис. 4.39. Поля зрения оптических каналов сканирующего прибора

щели модулятора δ (мгновенного углового поля) преобразуется в радиальное сканирование в пространстве предметов. На рис. 4.38 показаны три угловых поля каналов, которые сканируются единым щелевым вибромодулятором δ . Ромб-призмы обеспечивают оптимальную компоновку прибора. Конденсор 9 осуществляет проецирование выходного зрачка объектива 4 на чувствительную площадку фотодиода 10 .

Чтобы все три угловых поля прибора наложились на освещенную часть горизонта Земли, предусмотрен механизм уставок, с помощью которого возможен совместный поворот всех трех каналов вокруг оси OO_1 . Если направление на центр Земли совмещено с осью OO_1 , то электрические импульсы с трех фотодиодов поступают одновременно. При наклоне оси OO_1 относительно вертикали происходит рассогласование этих импульсов во времени. В этом рассогласовании и заложена информация об угловых координатах центра Земли в угловом поле прибора.

Для проверки функционирования каждого основного канала используется дополнительный канал в виде коллиматора, который состоит из светодиода 11 , матовой пластины 12 , щелевой диафрагмы 13 и объектива 14 .

Электрическая схема канала содержит следующие основные функциональные узлы:

- три усилительных канала, формирующих импульсные сигналы «1», «2», «3» по соответствующим сигналам трех оптических каналов;

- два блока приводов уставок с коммутаторами шаговых двигателей, осуществляющих введение уставок по α и ψ в прибор;
- вибромодулятор со схемой его запуска, осуществляющий перемещение щелей в угловых полях оптических каналов;
- схемы формирования опорных сигналов «0», «4», «5» на основе электромагнитных датчиков положения щели вибромодулятора;
- аналоговое вычислительное устройство, преобразующее сигналы «0», «1», «2», «3», «5» в управляющие напряжения U_Y , U_Z ;
- решающее устройство 1, осуществляющее разложение управляющих напряжений U_Y , U_Z на составляющие по осям неподвижной системы координат с учетом углов уставок α , ψ ;
- решающее устройство 2, формирующее сигнал наличия Земли на основе анализа импульсов «0», «1», «2», «3», «4», «5»;
- блок питания, блок реле.

Все перечисленные электронные узлы полностью зарезервированы. Переход на резервный комплект осуществляется с помощью блока реле.

Описанный прибор находился в эксплуатации на отечественных КА более 20 лет.

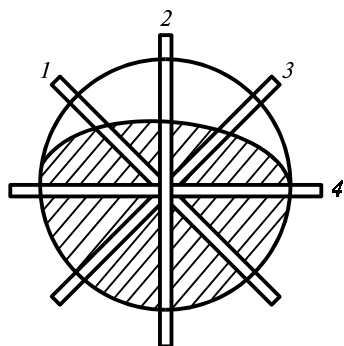


Рис. 4.40. Угловые поля оптических каналов статического прибора, наложенные на наблюдаемый диск Земли

В 1990-х годах для КА «Ямал-100», «Ямал-200» (геостационарная орбита) был разработан аналогичный прибор статического типа (без оптико-механического сканирования) на зарубежной элементной базе [20]. Прибор имеет четыре независимых оптических канала, угловые поля которых образуют 8 лучей, накрывающих наблюдаемый диск Земли (рис. 4.40). Каждый оптический канал представляет собой камеру-обскуру, содержит бленду, объектив в виде точечной щели и приемник ПЗС-линейку с 2048 элементами.

Угловые поля оптических каналов на рис. 4.40 обозначены цифрами 1, 2, 3, 4. Выходной сигнал каждого оптического канала преобразуется в 8-разрядный цифровой код и поступает в общий процессор, где производится обработка сигналов с четырех каналов и вычисление двух угловых координат центра Земли. Выходной сигнал выдается в цифровом виде по мультиплексному каналу обмена в соответствии с ГОСТ 26 765.52–87.

Прибор предназначен для работы на геостационарной орбите, его основные параметры следующие:

- диапазон углов отклонения оси визирования от направления на центр Земли в режиме поиска от $-3,5^\circ$ до $+3,5^\circ$, в режиме измерения от -2° до $+2^\circ$;
- минимальный угол Солнце–объект–Земля 30° ;
- погрешность измерения угловых координат центра Земли не более $5'$;
- время формирования параметров в режиме измерения не более 3,4 с;
- масса не более 2,7 кг;
- ресурс 10 000 ч;
- потребляемая мощность не более 12 Вт.

После проведения доработок программного обеспечения в процессе летных испытаний три прибора успешно работают в составе КА «Ямал-100», «Ямал-200».

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ СТЕНДОВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТОЧНОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ОЭП ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ КА

В данной главе кратко рассмотрены основные типы стендов, которые используются для определения погрешностей измерений рассматриваемых угломеров (ОЭП ориентации и навигации КА). Это так называемые точностные стенды. Эти стенды по сравнению с другими наиболее сложные. Погрешности углового положения их визирных линий относительно посадочного места под прибор, определяющие точность стенда, в несколько раз меньше погрешностей испытываемых на них современных ОЭП ориентации и навигации КА, погрешности измерений которых от единиц угловых секунд до единиц минут. В зависимости от точности стенда формируются и требования к условиям его эксплуатации (по температуре воздуха, скорости изменения температуры воздуха, градиенту температуры помещения, атмосферному давлению, относительной влажности воздуха, запыленности воздуха в помещении и т.д.).

Следует отметить, что описание самих стендов по большей части приведено обобщенно, без рассмотрения ряда вспомогательных устройств и аппаратуры для проведения юстировки и аттестации указанных стендов. Эти устройства и аппаратура весьма разнообразны по своим конструктивным решениям и, по существу, входят в состав стенда, во многом определяя его точность. Однако их всестороннее рассмотрение привело бы к существенному увеличению объема всей работы, что авторы сочли нерациональным.

5.1. Традиционные варианты построения стендов

Для проведения точностных испытаний ОЭП ориентации и навигации КА наибольшее распространение получил тип стенда с посадочным местом в двухступенном подвесе (рис. 5.1). Излучение от имитатора астроориентира (цели) 1, установленного на основании 9, пройдя светоделительную пластину 2, попадает во входной зрачок испытываемого астроприбора 5, установленного в двухступенном подвесе стенда. Оси подвеса взаимно перпен-

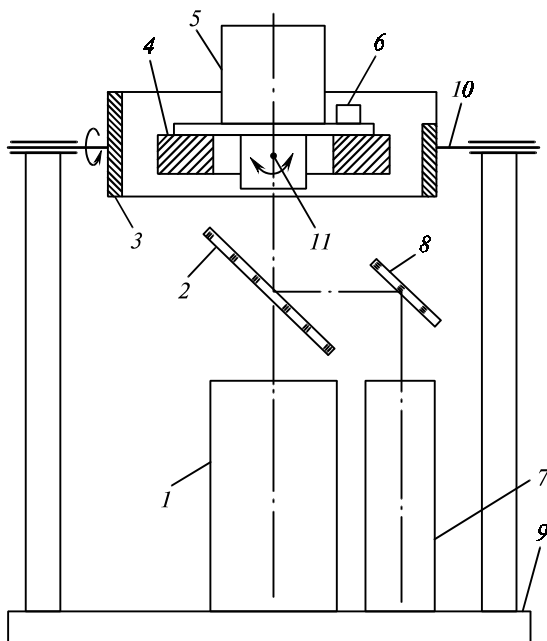


Рис. 5.1. Стенд с посадочным местом в двухступенном подвесе:

1 — имитатор астроориентира; 2 — светоделительная пластина; 3 — внешняя рамка подвеса; 4 — внутренняя рамка подвеса; 5 — испытуемый ОЭП ориентации и навигации КА; 6 — зеркальная призма (куб); 7 — имитатор оптической помехи; 8 — плоское зеркало; 9 — основание; 10 — ось внешней рамки подвеса; 11 — проекция оси внутренней рамки подвеса

дикулярны. Как правило, при проектировании стенда стремятся, чтобы эти оси пересекались в центре входного зрачка испытуемого астроприбора (точка 11). На осях подвеса установлены датчики углов поворота его рамок и привода для их разворота (ручные или электрические).

Обычно имитатор астроориентира представляет собой коллимирующий объектив, который формирует параллельные пучки излучения. В этом случае небольшая децентрировка выходного зрачка коллимирующего объектива относительно входного зрачка испытуемого астроприбора не приводит к снижению точности измерений. Вообще в этом случае входной зрачок испытуемого астроприбора является, по существу, выходным зрачком имитатора астроориентира.

Однако, если в качестве имитатора астроориентира используется, например, круглый плоский инфракрасный (ИК) излучатель (имитатор Земли), установленный на конечном расстоянии на основании 9, то в этом случае децентрировка центра входного

зрачка испытуемого астроприбора (земного ИК-прибора) относительно нормали, проведенной из центра окружности указанного круглого излучателя, приводит к погрешности угловых измерений, равной примерно C/L , где C — указанная децентрировка; L — расстояние от имитатора до центра входного зрачка астроприбора.

Если необходимо проверять точность астроприбора при воздействии оптических помех, то на стенде размещают имитатор помехи. Если требуется имитировать фоновую или точечную помеху, то излучение от имитатора помехи 7, последовательно отразившись от зеркала 8 и светоделителя 2, поступает во входной зрачок астроприбора. Если необходимо имитировать боковую помеху, то зеркало 8 и светоделитель 2 убирают, а имитатор боковой помехи устанавливают на стенде так, чтобы его визирная линия проходила через центр входного зрачка астроприбора (или центр входного окна его бленды) и образовывала с визирной линией имитатора астроориентира 1 заданный угол.

Посадочное место стенда представляет собой плоскость, на которой имеется или два штифта, или упоры. Указанная плоскость и прямая, касательная к штифтам, физически формируют базовую систему координат стенда. Базовая система координат астроприбора формируется аналогично — его посадочной плоскостью и линией, касательной к отверстиям под штифты или упоры.

Существует и другой способ формирования базовой системы координат астроприбора. На корпусе астроприбора вблизи его посадочного места жестко устанавливают зеркальную призму 6. Обычно это зеркальный кубик. Указанная призма и является физическим носителем базовой системы координат. При этом угловые положения нормалей к граням зеркальной призмы относительно посадочного места астроприбора измеряются (аттестуются) с высокой точностью. Стабильность углового положения зеркальной призмы относительно посадочного места обеспечивается конструктивно. Результаты этих измерений являются паспортными параметрами астроприбора. Рассмотренный способ формирования базовой системы координат удобен при размещении (установке) астроприбора на КА и позволяет относительно просто реализовать оптическую (автоколлимационную) «привязку» базовой системы координат астроприбора к другим системам координат КА. Однако в этом случае вносится дополнительная погрешность, вызванная возможной нестабильностью крепления зеркальной призмы на корпусе. Если удастся конструктивно реализовать указанные зеркальные грани на физическом носителе

опорной системы координат (на канале геометрического эталона), то в этом случае точность угловых измерений повышается (см. разд. 3.1).

Часто посадочное место рассматриваемого типа стенов выполняют таким образом, чтобы можно было устанавливать испытуемый прибор в два положения: «прямое» и с возможностью поворота прибора на посадочном месте вокруг приборной визирной линии на 180° . Благодаря этому в ряде случаев удается по специальной методике определить (разделить) погрешность испытуемого прибора и самого стенов.

Основным недостатком рассмотренного стенов является то обстоятельство, что испытуемый прибор устанавливается непосредственно на двухступенном подвесе. А это приводит к тому, что конструкция его рамок и опор (подшипников) должна исключать влияние массы проверяемого прибора на неизменность (стабильность) геометрической схемы подвеса.

Поэтому нашла применение схема стенов с неподвижным посадочным местом и с зеркальной сканирующей системой (рис. 5.2). Излучение от имитатора астроориентира 1, установ-

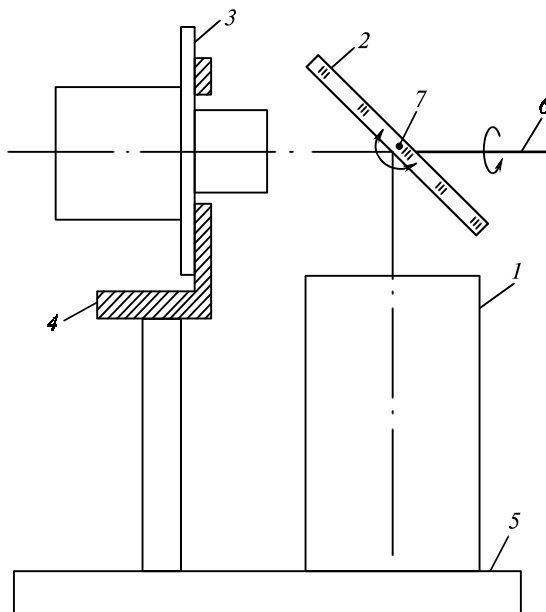


Рис. 5.2. Стенд с неподвижным посадочным местом и с зеркальной сканирующей системой:

1 — имитатор астроориентира; 2 — сканирующее плоское зеркало; 3 — испытуемый ОЭП ориентации и навигации КА; 4 — посадочное место; 5 — основание; 6 — ось внешней рамки подвеса; 7 — проекция оси внутренней рамки подвеса

ленного на основании 5, отразившись от плоского сканирующего зеркала 2, проходит во входной зрачок испытуемого астроприбора 3, размещенного на неподвижном посадочном месте 4. Зеркало 2 установлено подвижно в двухстепенном подвесе (его рамки на рис. 5.2 не показаны). Оси подвеса, как и в предыдущем стенде, взаимно перпендикулярны. При повороте зеркала вокруг оси 7 визирная линия имитатора отклоняется на угол, который можно назвать углом полярного радиуса, а при повороте зеркала вокруг оси 6 визирная линия имитатора отклоняется на угол, который можно назвать полярным. При этом происходит вращение изображения, которое необходимо учитывать при работе с этим стендом. Если в сканирующей системе этого стенда использовать два плоских зеркала, можно и в этом стенде избавиться от эффекта вращения изображения. Платой за это является существенное увеличение расстояния от выходного зрачка имитатора до входного зрачка испытуемого прибора, что приводит к увеличению габаритных размеров сканирующей системы и самого имитатора.

Основным недостатком стенда с неподвижным посадочным местом и с зеркальной сканирующей системой является то, что при повороте зеркала 2 вокруг оси 7 на угол ϵ визирный луч имитатора отклоняется на угол 2ϵ . А это означает, что погрешность выставки углового положения визирной линии имитатора увеличивается в 2 раза по сравнению с угловой погрешностью датчика угла поворота, установленного на оси 7.

При испытаниях высокоточных угломеров необходимо выявлять нарушение взаимной перпендикулярности осей двухстепенного подвеса и их наклон по отношению к оси имитатора, а затем использовать значения этих параметров в качестве систематических погрешностей стенда и учитывать при работе стенда. Кроме того, при проектировании рассмотренных стендов для астроприборов, снабженных блендами, значительно увеличивается расстояние от имитатора астроориентира до входного зрачка испытуемого прибора, что существенно усложняет конструкцию стенда.

Все это привело к тому, что появилась третья схема стенда, в которой двухстепенной подвес исключен, а посадочное место стенда установлено подвижно с возможностью вращения только относительно одной оси (рис. 5.3). На основании 10 установлен датчик угла поворота 9, на подвижной части которого размещено посадочное место стенда 8. Датчик угла поворота может быть выполнен, например, в виде прецизионной делительной головки

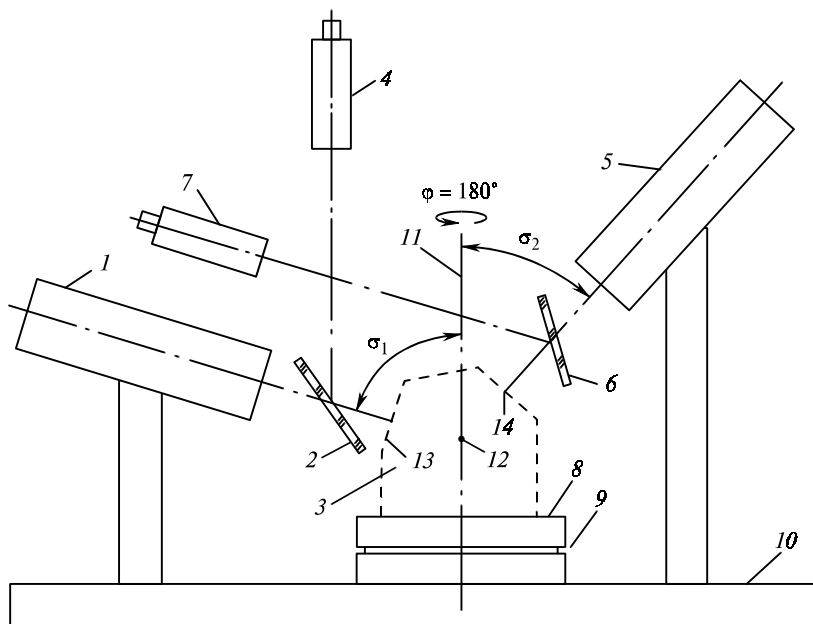


Рис. 5.3. Стенд с вращающимся посадочным местом:

1, 5 — имитаторы астроориентира; 2, 6 — светоделительные пластины; 3 — оптический калибр; 4, 7 — автоколлиматоры; 8 — посадочная плоскость стенда; 9 — датчик угла поворота; 10 — основание; 11 — ось вращения датчика угла поворота; 12 — точка пересечения визирных линий имитаторов с осью вращения датчика угла поворота; 13, 14 — зеркальные грани

или многогранной зеркальной призмы, установленной с возможностью вращения относительно оси 11. Углы нормалей граней призмы измерены и паспортизованы относительно «нулевой» грани призмы. Фиксация (измерение) угла поворота многогранной призмы с посадочным местом осуществляется автоколлиматором (на рис. 5.3 не показан), установленным на основании 10, визирная линия которого в исходном положении многогранника совмещена с нормалью «нулевой» грани призмы.

Этот стенд предназначен в основном для проведения точностных испытаний астороприборов с подвижной линией визирования (типа теодолита), визирный блок которых снабжен блендой. Точка 12, расположенная на геометрической оси 11, расположена также в точке пересечения осей двухступенного подвеса астороприбора при его установке на посадочном месте стенда. При этом точка 12 является точкой пересечения визирных линий имитаторов астроориентиров, установленных на основании 10. На рис. 5.3 таких имитаторов астроориентиров два 1 и 5.

При практической реализации этих стендов количество имитаторов астроориентиров не менее четырех. Они устанавливаются на основании стенда вокруг оси *11* под разными углами σ_n , образованными этой осью и визирными линиями имитаторов ($\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3 \neq \dots \neq \sigma_n$). Плоскости, в которых лежат эти углы σ_n , повернуты вокруг оси *11* относительно плоскости угла σ_1 на углы $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{n-1}$.

Для выставки и контроля углового положения визирных линий имитаторов астроориентиров используется оптический калибр *3*, светоделители *2*, *6* и автоколлиматоры *4*, *7*. Оптический калибр *3* представляет собой стеклянную призму с зеркальными гранями *13*, *14* (на рис. 5.3 показан штриховой линией). Посадочное место калибра (призмы) идентично посадочному месту испытуемого прибора. Угловое положение нормалей граней *13*, *14* относительно посадочного места призмы, которые измерены и аттестованы с высокой точностью, определяют угловое положение визирных линий имитаторов астроориентиров на стенде.

При выставке и контроле визирных линий имитаторов датчик угла поворота фиксируется в нулевом положении и на посадочное место стенда устанавливается калибр *3*. Включается подсветка автоколлиматора *4*. Параллельный пучок лучей, выйдя из автоколлиматора и последовательно отразившись от светоделителя *2*, грани *13*, светоделителя *2*, вернется обратно в автоколлиматор. С помощью юстировочных угловых подвижек автоколлиматора *4* добиваются совмещения его визирной линии с нормалью к грани *13* с последующей пространственной фиксацией автоколлиматора. Подсветка автоколлиматора *4* выключается и включает имитатор *1*. Для простоты и наглядности будем считать, что имитатор *1* представляет собой имитатор звезды. Параллельный пучок лучей, пройдя светоделитель *2* и последовательно отразившись от грани *13* и светоделителя *2*, войдет в автоколлиматор *4*. С помощью юстировочных угловых подвижек имитатора *1* (при юстировке стенда) добиваются совмещения его визирной линии с визирной линией автоколлиматора *4*, а следовательно, и с нормалью к грани *13*. Затем производят последующую пространственную фиксацию имитатора *1*. После чего включается подсветка автоколлиматора *7* и производятся действия, аналогичные вышеизложенным, в результате которых обеспечивается совмещение визирной линии имитатора *5* с нормалью к грани *14*. Те же действия проводятся и для других имитаторов стенда (на рис. 5.3 не показанных). Призма *3* снимается и на посадочное место стенда устанавливается испытуемый прибор.

Светоделительные пластины 2, 6 могут быть закреплены на стенде неподвижно. В этом случае их клиновидность на точность измерений не влияет. Если же конструкция крепления этих пластин выполнена «откидной» и при работе имитаторов с испытуемым прибором эти пластины выведены из рабочих пучков лучей, то их клиновидности необходимо учитывать в результатах измерений.

Существует ряд модификаций данного типа стенда. В ряде стендов нормаль к посадочной плоскости составляет заданный угол с осью вращения датчика угла поворота (наклонное посадочное место). Имеется стенд, у которого нет датчика угла поворота, а посадочное место стенда закреплено непосредственно на его основании.

Следует отметить, что данный тип стенда используется не только для проведения точностных испытаний угломеров, построенных по типу теодолита, но и для калибровки их геометрической схемы. Упрощенно эту процедуру можно представить следующим образом. Создается математическая модель угломерного прибора, в которой результаты измерений угломера представляются через параметры его геометрической схемы, в том числе, через значение коллимационной ошибки, а также наклонов его горизонтальной и вертикальной оси подвеса прибора. На основе результатов нескольких измерений, проведенных на стенде с конкретным образцом угломера, и математической модели угломера составляется система уравнений, в которой коллимационная ошибка, наклоны горизонтальной и вертикальной осей входят как искомые величины. В результате решения этой системы уравнений вычисляются значения коллимационной ошибки, наклонов горизонтальной и вертикальной осей подвеса этого конкретного угломера. Далее указанные значения в качестве поправок (паспортных значений) используются для конкретного угломера в его алгоритме измерений угловых координат визируемой цели, в том числе и целей, имитируемых на данном стенде.

Недостатком рассмотренного типа стенда является невозможность изменения углов σ_n и его большие габаритные размеры.

5.2. Стенды на основе нерасстраиваемых и самокалибрующихся сканирующих систем

В рамках концепции оптики адаптивных угломеров (см. разд. 3.1) в последние годы были предложены новые типы точностных стендов для испытаний современных ОЭП ориентации и навигации КА. Ряд этих стендов практически реализован. Основы

теории этих стендов изложены в [11, 34, 35]. Проиллюстрируем принципы построения адаптивных стендов на двух примерах.

Пример 1. Стенд создан на основе нерасстраиваемой сканирующей системы (рис. 5.4). Часть параллельных пучков излучения имитатора астроориентира 1, пройдя полый вал датчика угла поворота 2 и отверстие в основании сканирующей системы 3, войдут в нерасстраиваемые призмы 4, 5. Призмы крепятся на основании 3, а основание — на подвижной части датчика 2. Ось вращения датчика 2, который установлен на имитаторе астроориентира 1, геометрически пересекает точку 11. После прохождения указанных призм пучки лучей, представленные на рисунке векторами A_1 , A_2 , пересекутся в точке 11. Другая часть пучков излучения, показанная в виде вектора A_0 , пройдя полые валы элементов схемы 2, 3, также пересечет точку 11. При установке испытуемого прибора на посадочное место 6 его центр входного зрачка совмещается с точкой 11. Посадочное место 6 установлено на подвижную часть датчика угла поворота 7, ось вращения которого геометрически проходит через точку 11. Имитатор астроориентира 1 и датчик 7 размещены на основании стенда 9.

В зависимости от решаемых задач количество нерасстраиваемых призм (элементов) в сканирующей системе может варьироваться от одной до нескольких (например, четырех). Вообще, принципы построения этого стенда во многом аналогичны стенду с вращающимся посадочным местом (рис. 5.3). Однако имеются и существенные отличия.

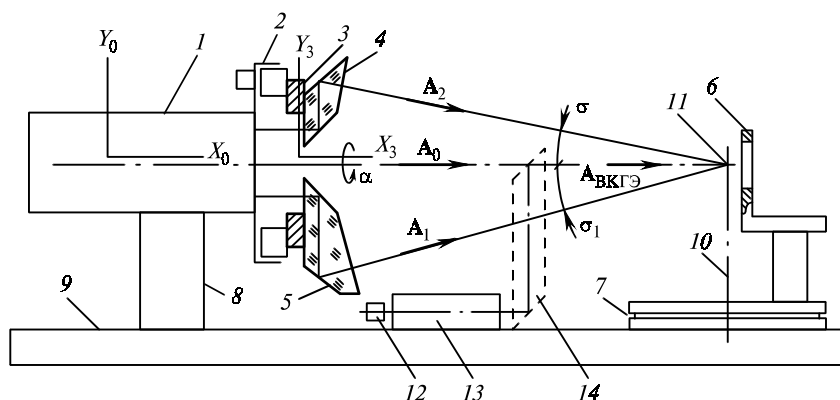


Рис. 5.4. Стенд на основе нерасстраиваемой сканирующей системы:

1 — имитатор астроориентира; 2 — датчик угла поворота; 3 — основание сканирующей системы; 4, 5 — нерасстраиваемые призмы; 6 — посадочное место стенда; 7 — датчик угла поворота; 8 — крепление имитатора; 9 — основание стенда; 10 — ось вращения датчика угла поворота; 11 — точка пересечения визирных линий имитатора с осью вращения датчика угла поворота; 12 — осветитель; 13 — нерасстраиваемый коллиматор; 14 — ромб-призма

Чтобы увеличить число углов наклона имитируемых пучков лучей относительно вектора A_0 ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_n$), изготавливают несколько сканирующих систем с возможностью их установки на подвижную часть датчика угла поворота 2. Другими словами, сканирующие системы сменные. А это по сравнению с рассмотренным выше стендом с вращающимся посадочным местом является принципиальным отличием. При этом в силу свойства нерасстраиваемости возможные микроповороты сканирующей системы и ее призм относительно любой гипотетической оси, перпендикулярной визирной линии имитатора (вектору A_0) практически не приводят к изменению углов $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_n$. Указанные микроповороты обусловлены разными причинами: биением осей в подшипнике, обеспечивающем вращение сканирующей системы вокруг вектора A_0 , погрешностью базировки сканирующей системы при ее переустановке и т. д.

Рассмотрим свойство нерасстраиваемости призм сканирующей системы более подробно на примере призмы 4. Ось X_0 системы координат (СК) $X_0Y_0Z_0$ имитатора 1 совпадает с его визирной линией (A_0). С плоскостью Y_3Z_3 СК $X_3Y_3Z_3$ сканирующей системы совпадают входные грани призм 4, 5. Эти призмы по существу представляют собой двойные зеркала с углом между зеркалами, равным $0,5\sigma_n$. При этом сама призма разворачивается в плоскопараллельную пластину. Значения углов $0,5\sigma_n$ паспортизируются с точностью, превышающей в несколько раз точность испытываемого угломера. Ребра пересечения их зеркальных (рабочих) граней призм 4, 5 параллельны оси Z_3 . Сканирующая система (СК $X_3Y_3Z_3$) может поворачиваться на заданный угол α , который регистрируется датчиком угла поворота 2. При номинальной геометрии стенда оси X_0, X_3 и СК X_0Y_0, X_3Y_3 в исходном (нулевом) положении совпадают. Вектор, описывающий угловое положение пучка лучей, выходящих из призмы 4, обозначим как $A_{2н}$, который образует с вектором A_0 угол σ . При нарушении геометрии призма займет новое угловое пространственное положение и угловое положение выходящего вектора изменится (при линейных смещениях призмы этого не происходит). Оценку влияния нарушения геометрии на угловое положение выходящего из призмы вектора будем производить, используя величину $|\Delta A_2|$, где $|\Delta A_2| = |A_2 - A_{2н}|$. Вектор ΔA_2 характеризует отклонение фактического углового положения вектора A_2 относительно $A_{2н}$ (по существу, это угол между векторами A_2 и $A_{2н}$).

В результате проведенного математического моделирования нарушения геометрии получены следующие результаты. Если плоскость Y_3Z_3 отклонилась от плоскости Y_0Z_0 на малый угол $\Delta\epsilon_m$, то максимальное значение $|\Delta A_2|_{\max} = [2\sin^2(0,5\sigma)]\Delta\epsilon_m = \Theta\Delta\epsilon_m$ [34, 35].

Пусть испытуемый астроприбор имеет угловое поле $2\omega = 10^\circ$. $\sigma \leq \omega$. Тогда $|\Delta A_2|_{\max} = \Theta \Delta \epsilon_m = 0,0038 \Delta \epsilon_m$. Предположим, что погрешность базировки сканирующей системы $\Delta \epsilon_m = 10''$. В этом случае угловая погрешность пучка лучей, описываемого вектором A_2 , $|\Delta A_2|_{\max} = 0,038''$. То есть конструктивные требования к величине $\Delta \epsilon_m$ и, в частности, к биению подшипника, обеспечивающего вращение сканирующей системы, могут быть существенно снижены.

Если же при нарушении геометрии плоскость $X_3 Y_3$ отклонилась от плоскости $X_0 Y_0$ на малый угол $\Delta \alpha$, то в этом случае $|\Delta A_2| = \Delta \alpha \sin \sigma$. Пусть испытуемый астроприбор, как и прежде, имеет угловое поле $2\omega = 10^\circ$ ($\sigma \leq \omega$). Тогда $|\Delta A_2| = \Theta_1 \Delta \alpha = 0,087 \Delta \alpha$. Предположим, что погрешность базировки сканирующей системы вокруг оси X_0 $\Delta \alpha = 10''$. В этом случае угловая погрешность пучка лучей, описываемого вектором A_2 , $|\Delta A_2| = 0,87''$. В принципе контроль базировки сканирующей системы вокруг оси X_0 (относительно датчика угла поворота) возможен автоколлимационным методом.

Таким образом, в рассмотренном примере полученные величины Θ и Θ_1 характеризуют нерасстраиваемость сканирующей системы к нарушению ее геометрии.

Другое отличие стенда с нерасстраиваемой сканирующей системой (рис. 5.4) от стенда с вращающимся посадочным местом (рис. 5.3) состоит в том, что посадочное место b установлено подвижно с возможностью вращения относительно оси 10 датчика угла поворота 7 , что позволяет при наличии дискретного набора углов σ ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_n$) производить сканирование любой точки углового поля испытуемого астроприбора. Другими словами, в любую точку испытуемого прибора можно направить один из векторов, выходящих из сканирующей системы ($A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$), что невозможно сделать в стенде с вращающимся посадочным местом.

Ряд современных имитаторов астроориентиров в силу некоторых причин имеют временную нестабильность углового положения их визирных линий, что несколько ухудшает результаты точностных испытаний высокоточных астроприборов. В стенде с нерасстраиваемой сканирующей системой предусмотрены возможности для уменьшения влияния этого явления.

При проведении точностных испытаний на этом стенде имеется режим, когда астроприбором производятся измерения угловых координат векторов A_n не относительно посадочной плоскости, а относительно вектора A_0 . В частности, на основе таких измерений экспериментально уточняются полиномы, учитывающие влияние дисторсии объектива на точность измерений звездного астроприбора (см. разд. 3.3.2).

Если стабильность во времени углового положения визирной линии имитатора 1 не обеспечивает необходимую точность стенда, то для проведения контроля за указанной стабильностью имитатора можно ввести в состав стенда внешний канал геометрического эталона (ВКГЭ). Стенд на рис. 5.4 состоит из осветителя 12, нерасстраиваемого коллиматора 13, установленного непосредственно на основании стенда 9, и ромб-призмы 14. Конструкция коллиматора выполняется по одной из схем нерасстраиваемых коллиматоров, приведенных в разд. 3.1.1, и обеспечивает стабильное положение его визирной линии. Ромб-призма 14 абсолютно нерасстраиваемый элемент. Изменение ее углового положения в процессе проведения испытаний не влияет на угловое положение вектора $A_{\text{ВКГЭ}}$, который описывает угловое положение параллельного пучка лучей коллиматора после прохождения его призмы 14.

Контроль углового положения визирной линии можно проводить по-разному. Можно периодически вводить ромб-призму 14, перекрывая при этом центральный пучок лучей имитатора (вектор A_0). Непосредственно испытываемым прибором производится измерение угла между векторами A_0 и $A_{\text{ВКГЭ}}$, значение которого потом учитывается в результатах измерений.

Если использовать конструкцию ромб-призмы со светоделителем, приведенную на рис. 5.5, то ромб-призма может быть установлена неподвижно, что позволяет проводить измерения угла между векторами A_0 и $A_{\text{ВКГЭ}}$ практически в реальном масштабе времени.

Чтобы не применять проверяемый прибор для измерения стабильности имитатора астроориентира и повысить точность контроля углового положения его визирной линии, можно использовать специальный блок (рис. 5.6), который состоит из осветителя 4, нерасстраиваемого коллиматора 5 на основании 3, ромб-призмы со светоделителем 6 и регистрирующего устройства 8, содержащего объектив 7, в фокальной плоскости которого установлена матрица чувствительных элементов многоэлементного приемника излучения 9. Ромб-призма 6 периодически вводится в центральный пучок лучей имитатора (вектор A_0). Измерение угла между векторами A_0 и $A_{\text{ВКГЭ}}$ производится непосредствен-

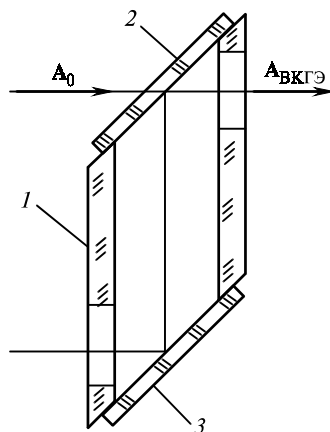


Рис. 5.5. Ромб-призма со светоделителем:

1 — полый корпус; 2 — плоскопараллельная пластина с нанесенным на нее светоделительным слоем; 3 — плоское зеркало

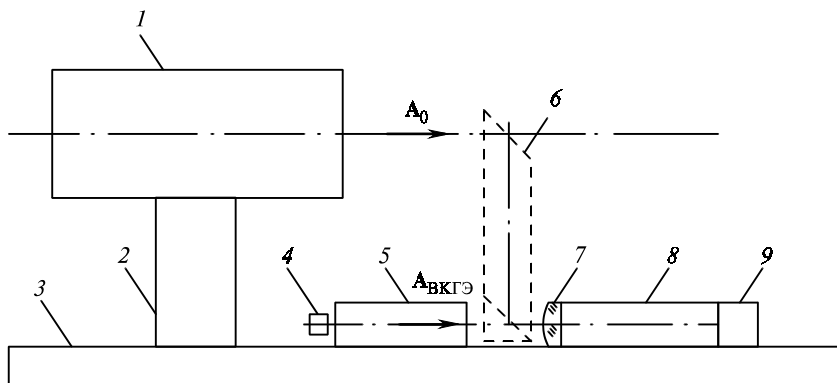


Рис. 5.6. Блок контроля углового положения визирной линии имитатора астроориентира:

1 — имитатор астроориентира; 2 — крепление имитатора; 3 — основание стенда; 4 — осветитель; 5 — нерасстраиваемый коллиматор; 6 — ромб-призма со светоделителем; 7 — объектив; 8 — регистрирующее устройство; 9 — многоэлементный приемник излучения

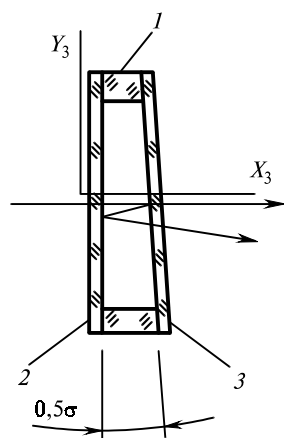


Рис. 5.7. Нерасстраиваемый светоделительный клин:

1 — полый клин; 2, 3 — плоскопараллельные пластины с нанесенными на них светоделительными слоями

но регистрирующим устройством 8. По сравнению с испытуемым астроприбором угловая чувствительность регистрирующего устройства 8 может быть существенно выше. Это может быть достигнуто, например, использованием в нем более длиннофокусного объектива по сравнению с испытуемым прибором.

В стендах с нерасстраиваемой сканирующей системой для испытаний звездных астроприборов нашел практическое применение и нерасстраиваемый светоделительный клин (рис. 5.7). Этот клин является также двойным зеркалом, и для него правомочны полученные выше выражения $|\Delta A_{21}|_{\max}$, $|\Delta A_2|$.

Следует отметить, что обычный преломляющий клин также нерасстраиваемый оптический элемент. Его применению в высокоточных стендах с нерасстраиваемыми сканирующими системами препятствует следующее обстоятельство. В преломляющих клиньях никогда не удается полностью устранить хроматическую аберрацию как для видимого спектрального диапазона, так и для более широкого рабочего спектрального диапазона испытуемого ОЭП ориентации и навигации КА. Поэтому

при создании точностного стенда на основе преломляющих клиньев для его юстировки и аттестации требуется разработка и изготовление специализированной оптико-электронной юстировочной и проверочной аппаратуры, работающей в спектральной области испытуемого ОЭП. Применение в этом случае нерасстраиваемых элементов на основе двойного зеркала (по существу, чисто зеркальных элементов, не обладающих хроматизмом) позволяет решать задачи юстировки и аттестации рассматриваемых стендов, используя для этого обычные оптические приборы, работающие в видимом спектральном диапазоне (совместно с глазом человека).

Пример 2. Адаптивный точностный стенд — это стенд с самокалибрующейся сканирующей системой (рис. 5.8, вид сверху). Конструкция сканирующей системы представляет собой модификацию оптического шарнира, который подробно описан в разд. 3.1.2. Оптический шарнир состоит из датчика угла поворота 2 внешней рамки подвеса 10, на которой последовательно установлены ромб-призма 4 и пентапризма 5. Датчик угла поворота 6 внутренней рамки подвеса установлен на внешней рамке подвеса. На внутренней рамке 9 также последовательно установлены ромб-призма 7 и пентапризма 8. Так как ромб-призмы не изменяют углового положения проходящих через них лучей света, то этот оптический шарнир является оптическим эквивалентом шарнира, изображенного на рис. 3.11. Входные грани пентапризм 5, 8 также снабжены селективными отражательными покрытиями (светоделителями).

В этом стенде усложнен имитатор астроориентира 1. Он имеет два канала (канал имитатора и канал автоколлиматора) с единой визирной линией в пространстве изображений (на выходе имитатора). Оси рамок подвеса и визирная линия имитатора на выходе пентапризмы 8 пересекаются в точке 12, под которой расположено посадочное место стенда. С точкой 12 совмещена точка пересечения осей подвеса испытуемого астроприбора с подвижной линией визирования. Для увеличения углового поля уставок визирной линии стенда конструктивно рамки подвеса 9, 10 могут быть выполнены незамкнутыми. Ориентация посадочного места 11 стенда относительно оптического шарнира также может быть иной.

С помощью канала автоколлиматора, призм, установленных на рамках провеса, и ЭВМ стенда осуществляется его самокалибровка, которая описана в разд. 3.1.2. Отметим лишь, что в процессе самокалибровки в ЭВМ поступают результаты измерений с двух датчиков углов поворота и канала автоколлиматора,

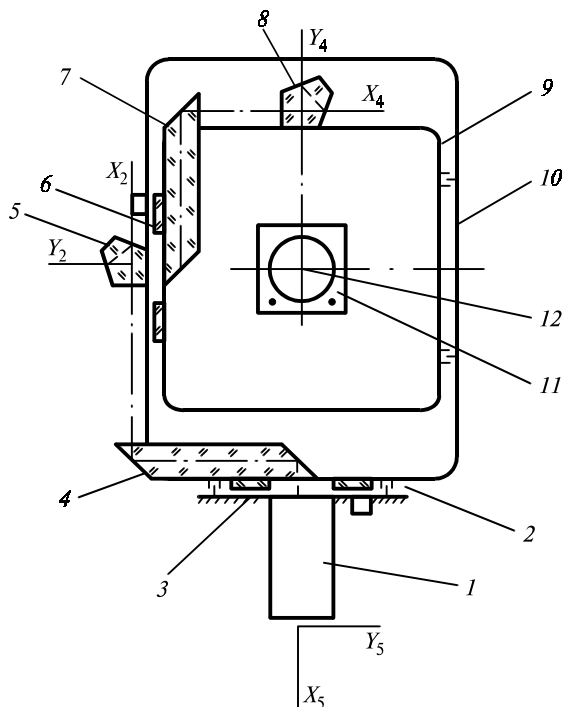


Рис. 5.8. Стенд на основе самокалибрующегося пространственного оптического шарнира:

1 — имитатор астроориентира; 2, 6 — датчики угла поворота; 3 — плоскость кронштейна, установленного на основании стенда; 4, 7 — ромб-призмы; 5, 8 — пентапризмы; 9, 10 — внутренняя и внешняя рамки подвеса; 11 — посадочное место стенда; 12 — точка пересечения осей подвеса и визирной линии имитатора

которые обрабатываются по определенному алгоритму. После чего ЭВМ вычисляет угловые положения визирной линии стенда, в которых нарушения геометрической схемы оптического шарнира исключены.

ИМИТАТОРЫ АСТРООРИЕНТИРОВ И ОПТИЧЕСКИХ ПОМЕХ ОЭП ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ КА

Имитаторы астрономических источников излучения, как и астроприборы, можно разделить на два типа: универсальные и специализированные. Универсальные имитаторы могут использоваться как самостоятельные приборы или как узлы, входящие в состав того или иного стенда, предназначенного для испытаний конкретного прибора или группы однотипных приборов. Имитаторы соответственно подразделяются на имитаторы звезды (звезд), фона, Земли и Солнца. При этом могут иметь место существенные конструктивные различия между имитаторами, используемыми для имитации источника излучения в качестве ориентира или того же источника в качестве оптической помехи. Как и астроприборы, рассматриваемые имитаторы астрономических источников излучения могут работать как в видимом спектральном диапазоне, так и в инфракрасном.

На НПП «Геофизика-Космос» для настройки и проверки ОЭП ориентации и навигации КА сформирован комплекс имитаторов, в который входят имитаторы звезд и фона видимого спектрального диапазона, разнообразные имитаторы Земли–атмосферы–космоса инфракрасного (ИК) диапазона, имитатор Земли видимого диапазона, ИК-имитатор Солнца (боковой помехи), имитатор Солнца (астроориентира) и имитатор Солнца (боковой помехи) видимого диапазона. Большинство этих имитаторов изготовлены на указанном предприятии, остальные созданы по его техническому заданию.

6.1. Имитаторы звезды и фона видимого диапазона

Рассмотрим наиболее распространенный универсальный имитатор звезды и фона видимого диапазона (рис. 6.1), который используется в качестве излучателя, имитирующего точечные источники излучения определенного спектрального диапазона и заданного диапазона эквивалентных освещенностей (канал точки) и в заданном диапазоне яркости фона (канал фона).

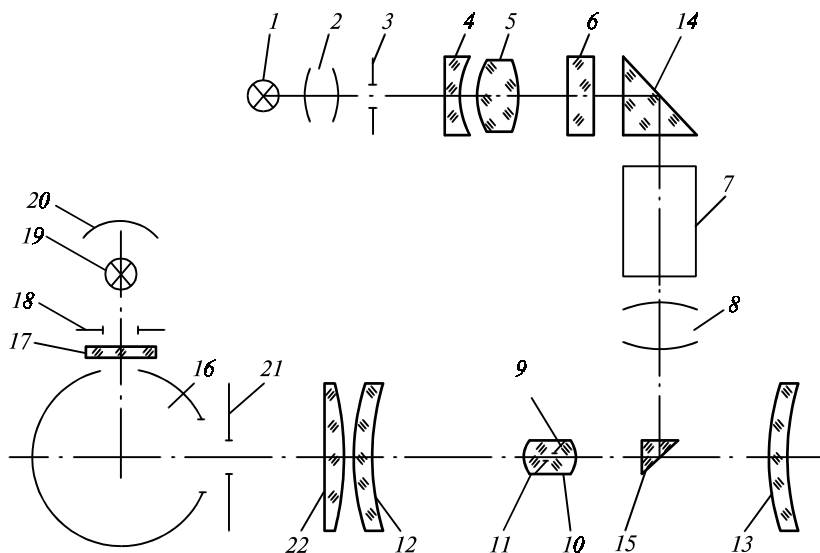


Рис. 6.1. Имитатор звезды и фона видимого диапазона:

1 — лампа; 2 — конденсор; 3 — диафрагма; 4, 5 — объектив; 6 — корректирующий светофильтр; 7 — ослабитель светового потока; 8 — объектив; 9 — точечная диафрагма (полевая диафрагма канала точки); 10, 11 — линзы; 12 — сферическое зеркало (линза); 13 — линзовый мениск; 14, 15 — призмы; 16 — фотометрический шар; 17 — светофильтр; 18 — щелевая диафрагма; 19 — лампа; 20 — рефлексор; 21 — полевая диафрагма канала фона; 22 — линза

В канале точки светящееся тело лампы накаливания 1 осветительного узла проецируется конденсором 2 в плоскость диафрагмы 3, расположенной в фокальной плоскости объектива 4, 5 коллиматорной трубки, в параллельном пучке лучей которого стоит корректирующий светофильтр 6. Этот светофильтр, обеспечивающий преобразование спектра лампы накаливания 1 в спектр звезды G2-V (спектр Солнца), может дискретно выводиться (вводиться) из светового пучка лучей. После коррекции излучение проходит через ослабители светового потока 7 и объективом 8 фокусируется в плоскость точечной диафрагмы, расположенной между линзами 10 и 11. Наклон диафрагмы обеспечивает исключение сфокусированных бликов в системе «имитатор звезды–проверяемый звездный астроприбор». Преломляющие поверхности линз 10, 11 концентричны центру точечной диафрагмы 9, которая совмещена с фокальной плоскостью объектива, состоящего из сферического зеркала 12 и мениска 13. Призмы 14, 15 служат для изменения направления хода лучей.

Имитатор обеспечивает имитацию звезд с возможностью изменения их блеска в диапазоне 8 звездных величин, что соответствует изменению освещенностей на его выходном зрачке

примерно в 1600 раз. Такой перепад освещенностей формируется ослабителем 7, который состоит из трех элементов:

- дискретно вводимой (выводимая) кварцевой пластины с нейтральным светоделителем;
- плавным ослабителем, который представляет собой набор тонких пластинок, параллельных друг другу и в исходном положении параллельных оптической оси имитатора, помещенных в каркас, который может вращаться относительно оси, перпендикулярной оптической оси имитатора; при вращении каркаса с решеткой изменение видимых (в направлении светового потока) зазоров между пластинами изменит световой поток;
- дискретного ослабителя, представляющего собой турель с одним свободным окном и двумя постоянными решетками (ослабителями), введение каждой них в световой пучок дискретно изменяет световой поток.

В рабочем положении решетки плавного и дискретного ослабителей взаимно перпендикулярны, что минимизирует влияние дифракции при формировании изображения имитируемой звезды.

В канале фона излучение от лампы 19 с рефлектором 20 проходит через щелевую диафрагму 18, плавно регулируемую световой поток, и нейтральный светофильтр 17, дополнительно дискретно ослабляющий световой поток, попадает в фотометрический шар 16 и, многократно отражаясь от стенок шара, равномерно освещает полевую диафрагму 21, находящуюся в фокальной плоскости трехлинзового объектива (линзы 22, 12, 13), после которого идет параллельным пучком.

Основные технические характеристики имитатора:

- выходной световой диаметр объектива 100 мм;
- диаметр нерабочей зоны в центре объектива 12 мм;
- угловой размер точки не более 5";
- диапазон звездных величин m_V канала точки от $-2,^m0$ до $+6,^m0$;
- стабильность положения визирной линии канала точек имитатора относительно его базовых плоскостей при изменении освещенности в пределах всего рабочего диапазона величины m_V и в течение непрерывной работы, до 8 ч включительно, должна быть не хуже 2";
- рабочий спектральный диапазон канала точки от 0,36 до 1,1 мкм;
- номинальный спектр излучения канала точки соответствует спектру звезды G2-V;
- источник излучения канала точки — лампа СИРШ6-100-1;
- угловой размер фона не менее 3°;

- диапазон изменения яркости фона от 50 до 10^{-3} кд/м²;
- рабочий спектральный диапазон канала фона от 0,36 до 1,1 мкм;
- спектр излучения канала фона соответствует источнику типа А.

Следует отметить, что на практике многие образцы имитаторов имеют стабильность положения визирной линии не хуже 1".

Имеется также модификация рассмотренного имитатора, в котором канал фона отсутствует. На основе осветителя с фотометрическим шаром рассмотренного имитатора создан имитатор фона для звездных астроприборов. Его основные технические данные:

- входной световой диаметр объектива 100 мм;
- угловое поле 11°;
- диапазон имитируемых яркостей до ~ 100 кд/м².

Имитатор фона состоит из осветителя с фотометрическим шаром, с выходным отверстием которого совмещена передняя фокальная плоскость однолинзового объектива.

6.2. Имитаторы Земли

6.2.1. Имитатор Земли–атмосферы–космоса инфракрасного диапазона

Высота КА над Землей может быть весьма различной. Угловые размеры Земли, воспринимаемые с КА, могут быть от единиц до близких к 180°. При работе прибора на КА, движущемся по эллиптической орбите, угловые размеры Земли существенно изменяются во время полета. Для круговых орбит КА угловые размеры Земли постоянные.

Угловые размеры Земли 2φ , воспринимаемые с КА, определяются выражением

$$2\varphi = 2 \arcsin \frac{R + h}{R + H},$$

где R — радиус Земли; h — высота переходного слоя (принятая высота атмосферы Земли); H — высота КА относительно поверхности Земли.

Угловой размер переходного слоя вычисляется по формуле

$$\Delta\varphi = \arcsin \frac{R + h}{R + H} - \arcsin \frac{R}{R + H}.$$

$2\varphi = 15,8^\circ$, $\Delta\varphi = 1,5'$ при принятом $h = 20$ км для высоты $H = 40\,000$ км, а для $H = 200$ км $2\varphi = 153^\circ$, $\Delta\varphi = 44'$.

Учитывая, что абберационный (дифракционный) кружок рассеяния объективов современных земных астроприборов, работающих в спектральных диапазонах до 16 (20) мкм, существенно меньше 44', возникает проблема имитации переходного слоя (атмосферы) для низкоорбитальных КА в рассматриваемых имитаторах Земли–атмосферы–космоса (ИЗАК).

По сравнению со звездными астроприборами в земных приборах необходимо имитировать значительно больше параметров. Условия имитации для земных приборов существенно отличаются в режиме поиска и измерения. Для режима поиска (режима определения наличия Земли в зоне сканирования угловых полей прибора) характерны большие углы отклонения системы координат КА от вертикали Земли (до десятков угловых градусов), поэтому часть ИЗАК, имитирующая космос, должна иметь большой угловой размер. Современные земные приборы в режиме измерения должны определять с высокой точностью угловое отклонение системы координат КА от вертикали Земли в небольшой зоне (около $\pm 2^\circ$) в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Для приборов кругового сканирования необходимо имитировать горизонт Земли полностью (замкнутый круг). Для приборов секущего сканирования можно имитировать отдельные участки горизонта (дуги круга, по которым непосредственно проходит траектория сканирования прибора). При этом современные двухкоординатные земные астроприборы секущего сканирования могут иметь два разнесенных в пространстве входных зрачка, что также существенно влияет на конструкцию имитатора Земли–атмосферы–космоса.

Из вышеизложенного становится понятным, что создать универсальный ИЗАК весьма проблематично. Более того, для одного земного астроприбора может потребоваться несколько ИЗАК (в частности, поисковый и точностной). Поэтому ИЗАК в общем случае является специализированным имитатором, который входит в состав стенда для испытаний прибора. В каждом таком стенде над ИЗАК располагается двухступенный подвес, по осям которого установлены привода и датчики угловых поворотов его осей. На указанном подвесе располагается посадочное место для поверяемого прибора. В конструкцию каждого ИЗАК входит подогреваемое черное тело, которое формой и температурой имитирует Землю (полностью или частично), и охлаждаемый фон, имитирующий космическое пространство.

Так как мгновенное угловое поле большинства земных астроприборов составляет единицы угловых градусов (примерно 3°), то проблема формирования переходного слоя в ИЗАК для указанных приборов, установленных на низкоорбитальных КА,

решается следующим образом. Имитацию горизонта Земли осуществляют с помощью круглого черного тела, края которого выполняют в виде «пилы». Размер зубцов этой «пилы» и их период имитируют заданный переходный слой для указанного значения углового поля. Другими словами, имитацию переходного слоя обеспечивают тем, что кромку детали, имитирующей переходную зону «Земля–атмосфера–космос», выполняют в виде регулярной зубчатой структуры. Высота ее зубцов соответствует угловому размеру переходного слоя, а в мгновенное угловое поле земного астроприбора должно входить несколько периодов указанной регулярной структуры.

Средняя температура Земли, воспринимаемая из космического пространства, близка к 240 К (от 200 до 300 К [16]). Температура космического пространства близка к абсолютному нулю (0 К). Таким образом, имитируемый температурный контраст между Землей и фоном должен быть более 240°С при температуре фона 0 К.

В истории создания ИЗАК были проекты, в которых имитатор располагался в термовакуумных камерах, в которых фоны охлаждались жидким азотом. Однако многолетняя практика создания и испытаний земных ИК-астроприборов привела к следующей концепции (подходу) формирования энергетического контраста между сканируемой Землей и фоном. Разность температур между фоном и черным телом, имитирующим Землю, в ИЗАК должна быть такова, чтобы энергетический контраст (контраст электрических сигналов), воспринимаемый земным астроприбором, был эквивалентен реально имеющемуся контрасту между Землей и космосом. На практике при температуре фона 15°С температурный контраст между фоном и черным телом, имитирующим Землю, составляет не более $\Delta t = 85^\circ\text{C}$. При этом для проверяемых земных ИК-приборов обеспечивается требуемый энергетический контраст $\Delta B_{\text{эф}}$ для всех имитационных моделей.

Энергетическая яркость Земли в зависимости от времени года, широты и т.д. меняется в широких пределах, поэтому используются различные модели Земли, учитывающие те или иные факторы (об этом говорилось в разд. 1.3.2). Распределения энергетической яркости для моделей А и В представлены на рис. 6.2, а, б.

Оптическая система ИЗАК, как правило, чисто зеркальная. Юстировка и аттестация геометрических размеров изображений, формируемых зеркальными ИЗАК (например, угловой размер имитируемой Земли), осуществляется, как правило, визуальными средствами контроля. Применение в ИЗАК преломляющих оптических деталей (например, из германия) приводит к тому, что для проведения вышеуказанной юстировки и аттестации требуется создание высокоточного углоизмерительного ИК-устройства, которое по своей конструкции не менее сложное, чем испытуемый земной ИК-астроприбор.

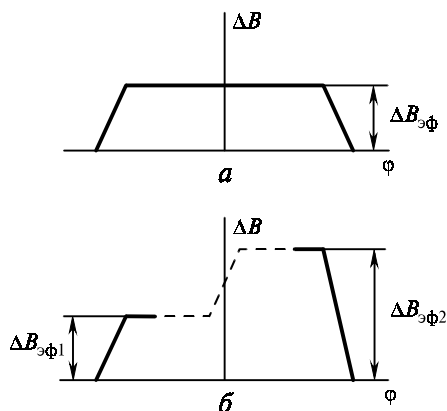


Рис. 6.2. Распределение энергетической яркости для модели излучения А (а) и В (б)

Энергетическая юстировка и аттестация ИЗАК осуществляется специальным ИК-радиометром, который устанавливается на посадочное место испытуемого прибора. Наличие в оптической системе ИЗАК деталей из германия и других преломляющих материалов также может приводить к дополнительной погрешности измерения энергетической яркости ИК-радиометром.

В процессе эксплуатации ИЗАК контроль за его энергетическими параметрами осуществляется по показаниям термодатчиков (например, термопар), установленных на черных телах, имитирующих Землю и фон.

В заключение данного раздела в качестве примера рассмотрим конкретный специализированный ИЗАК, предназначенный для настройки и проверки точностных характеристик в цеховых условиях конкретного земного ИК-астроприбора секущего сканирования для высоких орбит.

Основные технические данные ИЗАК:

- имитатор воспроизводит модели А и В теплового излучения Земли, соответствующего высотам КА:

$$\begin{aligned} H_1 &= 33\,796 \text{ км} & \phi_1 &= 9^\circ 09'; \\ H_1 &= 35\,796 \text{ км} & \phi_{1(\text{ср})} &= 8^\circ 43'; \\ H_1 &= 37\,796 \text{ км} & \phi_1 &= 8^\circ 19'; \end{aligned}$$

(ϕ_1 — половина углового размера имитируемой Земли);

- температура излучающей поверхности фона 15°C ;
- имитатор должен воспроизводить модель излучения А с энергетическими контрастами яркости $\Delta B_{эф} = (0,98; 0,41; 1,29) \text{ мВт}/(\text{см}^2 \cdot \text{ср})$;

- имитатор должен воспроизводить модель излучения В с энергетическим контрастом яркости $\Delta B_{1\text{эф}} - \Delta B_{2\text{эф}} = (0,56-1,12; 0,41-0,68; 0,96-1,29) \text{ мВт}/(\text{см}^2 \cdot \text{ср})$.

Принцип действия имитатора (рис. 6.3) основан на испускании излучения нагретого тела (Земля) и охлажденного тела (космос). Охлаждаемый фон, имитирующий излучение космоса, перекрывает зону обзора прибора. Верхний излучатель («черное тело») 5 имитирует излучение центральной зоны Земли. Охлаждаемый

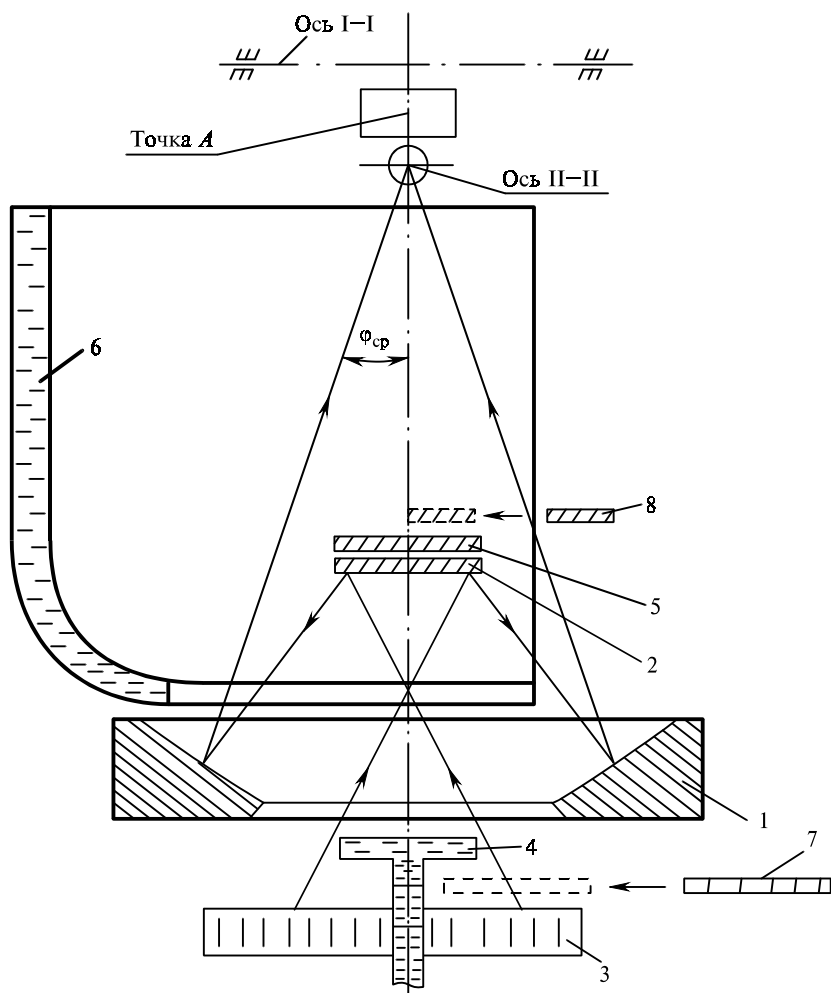


Рис. 6.3. Структурная схема имитатора Земля–атмосфера–космос:
 1 — зеркальный параболический тор; 2 — плоское зеркало; 3 — нижнее «черное тело»; 4 — охлаждаемый фон («грибок»); 5 — верхнее «черное тело»; 6 — охлаждаемый фон; 7, 8 — переключаемые излучатели

фон («грибок») 4 и нижний излучатель («черное тело») 3 — соответственно излучение космоса и Земли в зоне, близкой к границе контраста. Их взаимное расположение вызвано оборачиванием изображения оптической системы плоским зеркалом 2. Движение мгновенного углового поля проверяемого прибора происходит следующим образом: вначале мгновенное поле перемещается по холодному фону, затем переходит на параболический тор 1 и, отражаясь от плоского зеркала 2, начинает перемещаться по охлажденному «грибку» 4; затем доходит до его края, имитирующего границу контраста, пересекает ее, попадает на нижний излучатель 3 имитатора. Сойдя с параболического тора, мгновенное угловое поле переходит на верхний излучатель 5 и пересекает центр имитатора. Параболический тор 1 образован вращением участка параболической кривой вокруг оси O_1O_1 , наклоненной к оси параболы под углом $\varphi_{\text{ср}} = 8^\circ 43'$ и проходящей от точки фокуса на расстоянии 70 мм (рис. 6.4). Точка фокуса параболы описывает при вращении вокруг этой оси окружность, с которой должен совпадать край охлаждаемого «грибка» 4. Так как ИЗАК предназначен для земного астроприбора, установленного на высокоорбитальный КА, то слой атмосферы здесь не имитируется и кромка «грибка» 4 выполнена в виде ровной окружности. Излучение от «черного тела» и охлаждаемого «грибка» попадает на параболический тор, который формирует на выходе имитатора конус лучей, образованный параллельными лучами, т.е. имитируется бесконечность и угловой размер реального излучателя, равный $\varphi_{\text{ср}} = 8^\circ 43'$. Вершина конуса сканирования

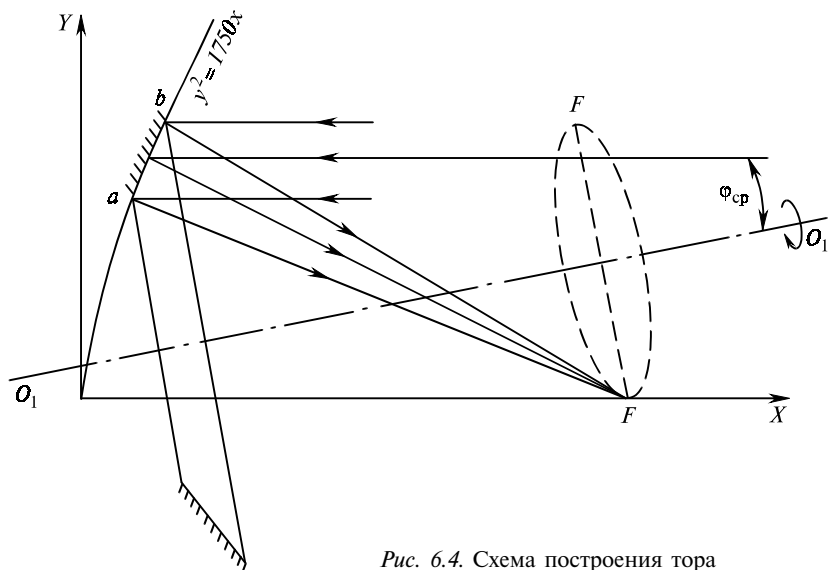


Рис. 6.4. Схема построения тора

прибора совмещается с точкой *A*, лежащей на оси имитатора и равноудаленной от точек пересечения осей прокачки подвеса I—I и II—II.

Имитация заданного контраста обеспечивается установкой соответствующих температур рабочих поверхностей излучателей имитатора. При работе изделия по модели В имитатор обеспечивает перепад по яркости с противоположных сторон модели до 6 раз. Для этого используются излучатели 7 и 8, которые вводятся в поле обзора изделия, перекрывая соответственно половину излучателей 3 и 5. Изменение углового размера Земли в диапазоне $\varphi_{\text{ср}} = 8^\circ 43' \pm 25'$ достигается совместным вертикальным перемещением «черного тела» с «грибком» 4. Поддержание постоянной температуры фонов 4, 6 осуществляется водяным охлаждением. Нагревание «черных тел» 4, 5, 7, 8 обеспечивается уложенной в них спиралью, разогрев которой происходит электрически.

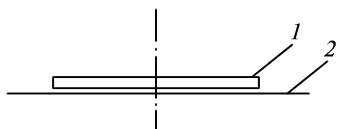


Рис. 6.5. Принципиальная схема простейшего ИЗАК:

1 — «черное тело» (имитируемая Земля); 2 — фон

Следует отметить, что для некоторых задач настройки и проверки земных ИК-астроприборов (особенно для устанавливаемых на высокоорбитальных КА) нашли применение простейшие ИЗАК (рис. 6.5), содержащие подогреваемое «черное тело» 1 в виде плоского цилиндра и охлаждаемого фона 2. Проверяемый земной астроприбор устанавливается

относительно этого ИЗАК на конечном расстоянии в двухступенном подвесе. Очевидным недостатком такого ИЗАК является то, что изображение кромки «черного тела» в фокальной плоскости объектива земного прибора дефокусировано. Размер дефокусированной зоны $\Delta\psi$ в угловой мере (в радианах) определяется по известной формуле

$$\Delta\psi \approx D/x,$$

где D — диаметр входного зрачка объектива; x — расстояние от кромки «черного тела» до объектива.

6.2.2. Имитатор Земли видимого диапазона

Имитатор Земли (астроориентира) предназначен для создания в видимом диапазоне спектра заданной яркости в его угловом поле, в котором имитируются изображения Земли.

Основные технические характеристики:

- рабочий спектральный диапазон 0,4–1,1 мкм, имитируемая яркость соответствует спектру источника А;

- выходной световой диаметр объектива 80 мм;
- угловые размеры трех имитируемых источников, обеспечиваемые набором сменных диафрагм излучателя:
 - 1) первого источника на круге диаметром $20^{\circ}10'$ (для угла «Солнце–объект–Земля 180° »);
 - 2) источника «светящийся» серп шириной $9'25''$ на круге диаметром $20^{\circ}10'$ (рис. 6.6) для угла «Солнце–объект–Земля 20° »;
 - 3) источника «светящийся» серп шириной $11'45''$ на круге диаметром $15^{\circ}48'$ (для угла «Солнце–объект–Земля 20° »);
- имитируемая яркость источников может изменяться от $0,4 \cdot 10^4$ до $3,5 \cdot 10^4$ кд/м².



Рис. 6.6. Имитируемый серп Земли

Следует отметить, что представленные значения технических характеристик обусловлены тем, что данный имитатор специализированный и работает с конкретным земным астроприбором видимого диапазона, установленным на КА, который имеет конкретные параметры орбиты.

Оптическая система имитатора показана на рис. 6.7. Свет от излучателя 1, пройдя систему сменных диафрагм 2, попадает на объектив 4. Так как сменные диафрагмы расположены вблизи фокальной плоскости объектива 4, то выходные пучки лучей параллельны. Для уменьшения рассеянного света между объективом и сменными диафрагмами расположена система диафрагм 3. Излучатель 1 построен по типу фотометрического шара, принцип действия которого описан, в частности, в разд. 6.1. Для обеспечения заданной яркости имитируемой Земли излучатель снабжен 8 лампами накаливания.

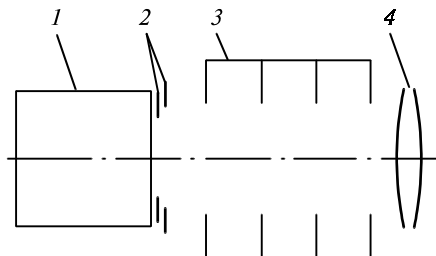


Рис. 6.7. Оптическая система имитатора Земли видимого диапазона:
1 — излучатель; 2 — система сменных диафрагм; 3 — система диафрагм;
4 — линзовый объектив

6.3. Имитаторы Солнца

6.3.1. Имитаторы Солнца видимого диапазона

Имитатор Солнца (астроориентира)

Имитатор Солнца (астроориентира) предназначен для настройки, проверки и испытания солнечных ОЭП ориентации и навигации КА, работающих в видимом диапазоне спектра. Этот имитатор используется в точностных стендах для настройки и испытаний указанных приборов.

Основные технические данные:

- выходной световой диаметр объектива 40 мм;
- спектральный диапазон 0,4–1,1 мкм;
- имитируемые угловые размеры Солнца 31'28", 31'59", 32'32" (с учетом сезонного изменения расстояния от Земли до Солнца);
- диапазон изменения освещенностей на расстоянии от 750 до 1500 мм от имитатора для угловых размеров полевых диафрагм:
 - 31'28" 85 000–180 000 лк,
 - 31'59" 89 000–185 000 лк,
 - 32'32" 92 000–192 000 лк;
- нестабильность положения визирной линии относительно базовых плоскостей имитатора в течение 3 ч непрерывной работы не более 4".

Оптическая система имитатора представлена на рис. 6.8. Его осветитель состоит из зеркального сферического отражателя 1, ксеноновой лампы 2 и конденсора 3. В осветителе применено водяное охлаждение. Конденсор проецирует наиболее яркую и стабильную часть плазмы ксеноновой лампы с увеличением 50^х во входной зрачок объектива 6. Для увеличения габаритной яркости и повышения равномерности распределения яркости в используемой части плазмы применяется рефлектор-отражатель сферический 1, в центре кривизны которого расположена наиболее яркая и стабильная часть плазмы. Для получения естественного распределения яркости по диску имитируемого источника перед каждой полевой диафрагмой может быть установлен фильтр переменной плотности 4. Угловые размеры Солнца имитируются введением в оптическую систему сменных полевых диафрагм 5, расположенных в фокальной плоскости объектива 6.

Регулирование освещенности осуществляется введением в световой пучок нейтральных светофильтров: одного постоянного 7 и одиннадцати сменных 8, а также изменением тока на лампе в пределах 120–155 А. Для уменьшения рассеянного света между полевой диафрагмой и объективом расположена система

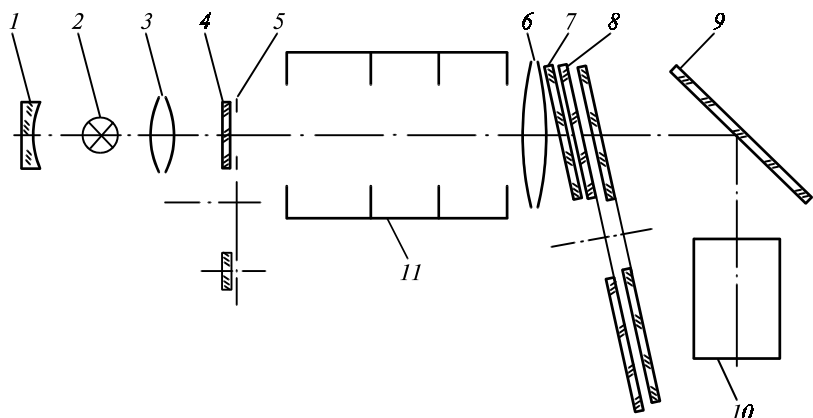


Рис. 6.8. Оптическая система имитатора Солнца (астроориентира) видимого диапазона:

1 — сферический отражатель; 2 — ксеноновая лампа; 3 — конденсор; 4 — фильтр переменной плотности; 5 — сменные полевые диафрагмы; 6 — линзовый объектив; 7, 8 — сменные нейтральные светофильтры; 9 — плоскопараллельная пластина; 10 — блок измерения неравномерности яркости; 11 — система диафрагм

диафрагм 11. Для исключения попадания бликов от нейтральных светофильтров 7 и 8 в испытываемые солнечные приборы эти нейтральные светофильтры установлены к оптической оси объектива с наклоном в 92° и 94° .

Плоскопараллельная пластина 9 делит световой пучок на две части: одна направляется на блок измерения неравномерности яркости 10, другая — используется как рабочая.

Имитатор Солнца (боковой помехи)

Имитатор Солнца (боковой помехи видимого спектрального диапазона) предназначен для создания мощного светового потока, близкого к спектру излучения Солнца, в основном для испытаний звездных приборов и их бленд.

Основные технические данные:

- выходной световой диаметр объектива 225 мм;
- угол поля: с основной диафрагмой $32'$; с дополнительной диафрагмой $60'$;
- освещенность на выходе объектива: 110 000 лк при угловом размере имитируемого источника $32'$, 180 000 лк — при $60'$.

Оптическая система имитатора представлена на рис. 6.9.

Центр катодного пятна ксеноновой лампы 2 совмещен с центром кривизны сферического рефлектора 1. Отраженные от рефлектора лучи создают обратное изображение катодного пятна,

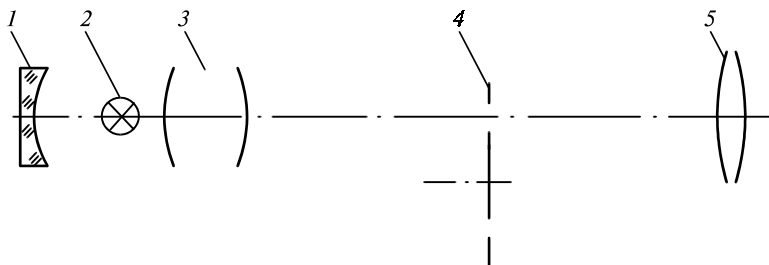


Рис. 6.9. Оптическая система имитатора Солнца (боковой помехи) видимого диапазона:

1 — сферический рефлектор; 2 — ксеноновая лампа; 3 — конденсор;
4 — сменная полевая диафрагма; 5 — линзовый объектив

совпадающее с самим пятном лампы. В этом осветителе используется водяное охлаждение. Пройдя пятилинзовый конденсор 3, излучение лампы создает обратное увеличенное изображение катодного пятна в плоскости сменной диафрагмы 4, расположенной в фокальной плоскости линзового объектива 5. Из объектива выходят параллельные пучки лучей (с расхождением $32'$ или $60'$).

6.3.2. Инфракрасный имитатор Солнца (боковой помехи)

Имитатор предназначен для имитации угловых размеров и энергетической яркости Солнца в процессе проверки помехозащищенности земных ОЭП ориентации и навигации КА ИК-диапазона.

Основные технические данные:

- спектральный диапазон излучения 0,5–20 мкм;
- энергетическая яркость в спектральном диапазоне 7–20 мкм не менее $2,8 \cdot 10^4$ Вт/(м² · ср);
- имитируемые угловые источники излучения (в угл. мин):

Номер источника излучения	Угловой размер источника (поля), угл. мин
1	Ø 3
2	Ø 10
3	Ø 32
4	Ø 40
5	5×40

- выходной световой диаметр объектива 60 мм;
- источник излучения — ксеноновая шаровая лампа; ее спектральное распределение яркости в ИК-области близко к спектру Солнца.

Оптическая система ИК-имитатора Солнца (боковой помехи) представлена на рис. 6.10. Центр катодного пятна (межэлектродный промежуток, рабочая часть разряда) ксеноновой лампы 2 совмещен с передним фокусом эллиптического зеркала 1, во втором фокусе которого установлена одна из пяти сменных полевых диафрагм. Через фокусы эллипса проходит его оптическая ось $A-A'$. В этом осветителе используют водяное охлаждение. Изображение катодного пятна с 6-кратным увеличением наложено на сменную полевую диафрагму 3, которая совмещена с передним фокусом зеркального внеосевого параболического объектива 5. Для уменьшения продольных размеров имитатора используется плоское («ломающее») зеркало 4. Параллельные пучки излучения от объектива выходят через отверстие диаметром 50 мм в цилиндрической пластине 6, которая имитирует равномерный фон, окружающий имитируемое Солнце.

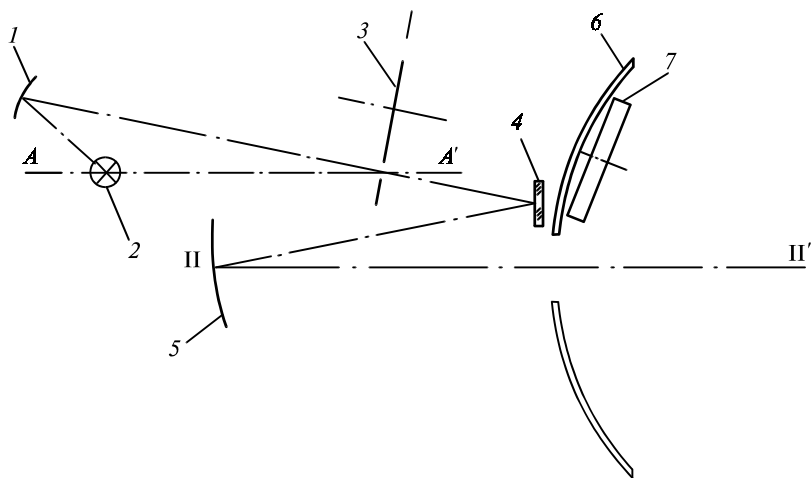


Рис. 6.10. Оптическая система ИК-имитатора Солнца (боковой помехи): 1 — конденсор (эллиптическое внеосевое зеркало); 2 — ксеноновая лампа со специальным окном из оптической керамики ПО-4; 3 — сменная полевая диафрагма; 4 — плоское зеркало; 5 — объектив (внеосевое параболическое зеркало); 6 — цилиндрическая пластина (фон); 7 — «черное тело»

В конструкции осветителя предусмотрена возможность перемещения лампы в трех взаимно перпендикулярных направлениях, а также изменение положения эллиптического зеркала 1. Окно лампы прозрачно как в видимом, так и в ИК-диапазоне, поэтому имитатор создает излучение в широком спектральном диапазоне. С помощью указанных подвижек лампы добиваются максимально возможной освещенности и максимального сечения (светового пятна) потока излучения ксеноновой лампы в плоскости указанной диафрагмы. Максимальную освещенность

измеряют люксметром, а максимальное сечение — визуально по размеру яркого пятна на просветном экране.

В состав имитатора входит контрольно-измерительное устройство, предназначенное для оценки и контроля энергетической яркости имитатора (на рис. 6.10 не приведено). Энергетическая яркость имитатора оценивается методом сравнения с энергетической яркостью высокотемпературного «черного тела» (ЧТ-1000), которое обеспечивает энергетическую яркость, соответствующую температуре 1000°С. При этом пучки лучей от имитатора и ЧТ-1000 с помощью поворотных зеркал после модуляции направляются на специальный ИК-радиометр. Если полученное соотношение сигналов с радиометра от имитатора (ксеноновой лампы 2) и ЧТ-1000 превышает заданное, то это свидетельствует о нормальном режиме лампы и самого имитатора.

Следует пояснить, что данный имитатор специализированный и эксплуатируется в составе стенда для проверки помехозащищенности земного ИК-прибора. В состав стенда также входит плоское «черное тело» 7 диаметром 410 мм, имитирующее Землю с возможностью обеспечения энергетического контраста относительно фона цилиндрической пластины 6 от 30 до 110 Вт/(м² · ср). Испытуемый прибор устанавливается на подвесе (на рис. 6.10 не показан), оси вращения которого пересекаются в точке, лежащей на оси II—II'.

В заключение также следует отметить, что ряд технических решений, на которых базируются рассмотренные имитаторы Солнца и звезды, представлены в справочнике ГОИ им. С.И. Вавилова (Справочник по имитаторам излучения, выпускаемым предприятиями отрасли / Под ред. В.К. Баранова. ОНТИ ГОИ, 1970. 81 с.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе сделана попытка обобщить опыт создания ОЭП ориентации и навигации КА в нашей стране за пять десятилетий космической эры. Зародившись в конце 50-х годов XX в., эта область человеческого знания интенсивно развивалась вместе с развитием космической техники и сегодня концентрирует в себе большое количество фактического, аналитического, экспериментального, теоретического материала и продолжает развиваться.

Специфической особенностью ОЭП ориентации и навигации КА является соединение в единой конструкции весьма сложной оптико-механической части и не менее сложной электронной части. Если проследить тенденцию изменения соотношения этих двух частей, то можно заметить следующую закономерность. На начальном этапе (1960–1970-е гг.) основная нагрузка по решению функциональных задач ложилась на оптико-механическую часть, электронные узлы выполняли вспомогательные функции и их доля в общем балансе массы была невелика. В приборах 1980-х годов значительная доля функциональных задач решалась электроникой, соответственно возросла их доля в балансе массы примерно до половины. В современных астроприборах еще более возрастает количество функциональных задач, решаемых электроникой, но массовая доля электронных узлов снижается. Это вызвано происходящим в последние десятилетия прогрессом в микроэлектронике и вычислительной технике. Сегодня задачи, которые 20–30 лет назад были под силу только наземным ЭВМ, успешно решаются входящими в состав прибора микропроцессорами; одновременно снижается масса электроники несмотря на возросшее число решаемых задач и общее снижение массы приборов. В такой ситуации дальнейшее уменьшение массы должно происходить за счет упрощения оптико-механической части.

Эта тенденция в развитии астроприборов реализуется сегодня в так называемых статических приборах — приборах без оптико-механического сканирования, построенных на базе многоэлементных приемников и электронного сканирования. Эта тенденция не исключает, что в дальнейшем при возникновении необходимости, например, в звездных приборах очень высокой помехозащищенности будут востребованы узкопольные адаптивные угломеры с подвижной линией визирования.

Первые звездные статические приборы были созданы в 1970-е годы на базе приемников с электронным сканированием — диссекторов. В то время необходимость использования электронного сканирования вызывалась другими требованиями — повышением чувствительности, помехозащищенности. В последние два десятилетия в звездных приборах успешно используются твердотельные многоэлементные приемники — ПЗС-матрицы. Обладая хорошими пороговыми характеристиками, малой массой и габаритными размерами, в сочетании с современной микроэлектроникой и микропроцессорной техникой они позволяют создавать компактные multifunctional приборы, выполняющие распознавание групп звезд, вычисление углов трехосной ориентации и др. ПЗС-матрицы имеют недостаток — значительное время накопления сигнала ограничивает возможность работы на подвижном основании. Потребность в этом возникает на КА хотя и в редких, но достаточно ответственных ситуациях. Устранить этот недостаток возможно, как нам представляется, использованием в звездном приборе информации об угловой скорости КА, получаемой от датчиков угловой скорости. Такой способ компенсации движения основания использовался и раньше, что давало возможность улучшить их динамические характеристики, помехозащищенность. Применительно к приборам с ПЗС-матрицами этот принцип может быть реализован несколькими способами. Если действие повышенной угловой скорости продолжается небольшое время (несколько секунд) и прибор работает в режиме слежения за группой звезд, то, имея информацию об угловой скорости, следует организовать на время ее повышенных значений перемещение стробов, следящих за положением звезд, по прогнозу. Прогноз должен предусматривать и вхождение в угловое поле новых звезд в процессе движения, и выход гидируемых. После того как угловая скорость снизится до приемлемой для эффективного накопления в ПЗС-матрице, должен быть осуществлен переход на обычное слежение по сигналам с ПЗС-матрицы. Увеличения допустимой угловой скорости КА при работе прибора в режиме распознавания можно добиться, если для распознавания использовать лишь наиболее яркие звезды из обычно используемого списка с учетом их регистрации в нескольких положениях углового поля на небесной сфере и с учетом информации о скорости при вычислении межзвездных угловых расстояний.

Создание первых статических солнечных приборов также относится к 1970-м годам. В то время был разработан прибор на базе фотоприемника с кодовой маской. Такое решение позволило реализовать точность около 1° в угловом поле $90 \times 90^\circ$; повышение точности ограничивалось технологическими и конструктивными

трудностями. Сегодня более перспективным является использование ПЗС-линеек, на основе которых приборы в настоящее время достаточно распространены. Сочетание малогабаритного твердотельного приемника, простой оптики и современной микроэлектроники создает хорошие предпосылки для их дальнейшего совершенствования. Недостаток таких приборов — трудности в получении полей обзора, близких к 180° . Сегодня эту проблему решают установкой нескольких приборов с меньшим угловым полем, но имеются и другие возможности при использовании тех же ПЗС-линеек. Некоторыми предприятиями ведутся работы по созданию солнечных приборов на основе КМОП-матриц активных пикселей. Такой подход несколько упрощает оптическую и электрическую схемы прибора, однако не решает проблем, связанных с увеличением углового поля, повышением точности. Более того, матричный приемник для солнечного прибора является избыточным в информационном плане в том смысле, что большая мощность солнечного излучения позволяет вести обработку оптического сигнала до преобразования в электрический (с помощью, например, V-растра), трансформируя его для использования более простого линейчатого приемника. Эта избыточность ведет к тому, что объем получаемой с матрицы информации очень велик, и приходится задействовать значительные вычислительные ресурсы, чтобы отсеять лишнюю информацию.

Сообщения о статических земных ИК-приборах появились в 1990-х годах. Речь шла о приборах, построенных на основе специализированных линейчатых многоэлементных приемниках. Наши разработки, проведенные несколько лет назад, показали, что сложности решения проблем создания специализированного приемника, системы коммутации для него не компенсируются соответствующим повышением основных характеристик прибора — точностных, массо-габаритных. В сегодняшних условиях разработку земного ИК-прибора целесообразно вести на базе универсальных тепловизионных матриц. Использование таких матриц дает перспективу улучшения не только массо-габаритных характеристик, но и точностных. Последнее вызвано тем, что объем информации о координатах Земли, который может быть получен с матричного приемника, существенно больше, чем в случае сканирования диска Земли с помощью одноэлементного приемника. Реализация отмеченного преимущества использования матриц возможна только при значительном пересмотре подходов к информационной обработке в приборе, к методической и метрологической группе вопросов.

Сегодня одно из основных требований к приборам — требование работы на орбите в течение длительного времени — 10 лет

и более. В связи с этим становятся весьма актуальными вопросы обеспечения устойчивости приборов к длительному воздействию факторов космического пространства. Если по таким факторам, как глубокий вакуум, УФ-излучение, влияние продуктов жизнедеятельности КА и т.п., имеются технические решения, подтвержденные большим опытом (орбитальная станция «Мир», КА серии «Космос» и др.), то по различного рода ионизирующим излучениям космического пространства этого опыта, к сожалению, недостаточно. Орбиты, на которых функционируют непилютируемые КА, являются весьма напряженными в смысле радиационных воздействий. Задача подавления дозовых эффектов от таких воздействий решается комплексно — от локальной защиты наименее стойких электрорадиоизделий в приборах и рациональной компоновки их узлов, надлежащего выбора материалов и форм корпусных элементов до выбора варианта размещения на КА. Противодействие влиянию потока высокоэнергетических частиц также должно решаться комплексом мер — схемотехнических, конструктивных, алгоритмических, программных и др. Суть этих мер — создать локальное резервирование функций с разнесением в пространстве или времени резервных элементарных операций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абакумов В.М.* Особенности измерения угловых координат звезд прецизионными оптико-электронными системами // *Оптический журнал.* 1996. № 7. С. 43–47.
2. *Аванесов Г.А., Воронков С.В., Куделин М.И., Фориш А.А.* Звездные координаторы систем ориентации космических аппаратов // *Известия вузов. Приборостроение.* 2003. Т. 46. № 4. С. 66–69.
3. *Аванесов Г.А., Никитин А.В., Фориш А.А.* Оптический солнечный датчик // *Известия вузов. Приборостроение.* 2003. № 4. С. 70–73.
4. *Ален К.У.* *Астрофизические величины.* М.: Мир, 1977. 446 с.
5. *Бакулин П.И.* *Курс общей астрономии.* М.: Наука, 1966. 438 с.
6. *Бакут П.А., Большаков И.А* и др. *Вопросы статистической теории радиолокации.* Т. 1, 2. М.: Сов. радио, 1963.
7. *Башкин Е.А., Расторгуев В.А., Савченко С.А., Симонов А.И.* Основные результаты экспериментального исследования световых помех на борту космических аппаратов // *Вопросы оборонной техники.* Сер. X. 1973. Вып. 65. С. 30–33.
8. *Бронштэн В.А., Гришин И.И.* *Серебристые облака.* М.: Наука, 1970. 126 с.
9. *Вальд А.* *Последовательный анализ.* М.: Физматгиз, 1960. 328 с.
10. *Волосов Д.С.* *Фотографическая оптика.* М.: Искусство, 1978. 543 с.
11. *Геггарт А.Я., Колосов М.П.* Анализ нерасстраиваемых оптических систем афокальных сканеров // *Оптический журнал.* 1998. № 8. С. 66–70.
12. *Глебович Л.А., Певунчиков И.В.* Перспективные схемы построения инфракрасных приборов ориентации по Земле // *Оптический журнал.* 1998. № 8. С. 76–79.
13. *Ежов О.М.* Сравнительный анализ алгоритмов обнаружения звезд для приборов ориентации с матрицами ПЗС // *Оптический журнал.* 1998. № 8. С. 56–60.
14. *Здор С.Е., Широков В.Б.* *Оптический поиск и распознавание.* М.: Наука, 1973. 239 с.
15. *Земляков В.А., Чибисов В.А.* Широкопольные приборы ориентации по Солнцу // *Оптический журнал.* 1996. № 7. С. 57–58.
16. *Ивандиков Я.М.* *Оптико-электронные приборы для ориентации и навигации космических аппаратов.* М.: Машиностроение, 1971. 200 с.
17. *Изнар А.И., Павлов А.В., Федоров В.Ф.* *Оптико-электронные приборы космических аппаратов.* М.: Машиностроение, 1972. 368 с.
18. *Инженерный справочник по космической технике / Под ред. А.В. Солодова.* М.: Воениздат, 1977. 430 с.
19. *Ишанин Г.Г., Попков Э.Д., Андреев А.Л., Польщиков Г.В.* *Источники и приемники излучения.* СПб: Политехника, 1991. 240 с.

20. Карасев В., Бранец В., Савченко С. и др. Анализ результатов эксплуатации приборов определения координат центра Земли на КА «Ямал-100», «Ямал-200» // IV Междунар. конф. «Малые спутники. Новые технологии. Миниатюризация», 2004. г. Королев Моск. обл. Кн. 3. С. 127–131.
21. Карасев В., Бранец В., Савченко С. и др. Анализ результатов эксплуатации приборов определения координат Солнца на КА «Ямал-100», «Ямал-200» // IV Междунар. конф. «Малые спутники. Новые технологии. Миниатюризация», 2004. г. Королев Моск. обл. Кн. 3. С. 122–126.
22. Карелин А.Ю., Кузьмин В.С., Панасенко А.Ф., Федосеев В.И. Повышение точности астроизмерений, выполняемых звездным прибором КА на основе полетной калибровки: Доклад на совместном заседании секции навигационных систем и их чувствительных элементов и Санкт-Петербургской секции прецизионной гироскопии научного совета РАН по управлению движением и навигации // Гироскопия и навигация. 1994. № 2. 92 с.
23. Катыс Г.П. Информационные сканирующие системы. М.: Машиностроение, 1965. 448 с.
24. Квазиус Г., Макэнлисс Ф. Проектирование систем астронавигации. М.: Мир, 1970. 304 с.
25. Колосов М.П. Анализ оптической системы с пространственным шарниром // Оптико-механическая промышленность. 1987. № 12. С. 36–38.
26. Колосов М.П. Борьба с боковыми помехами в оптико-электронных приборах // Оптико-электронные системы визуализации и обработки оптических изображений: Сб. ст. / Под ред. В.В. Тарасова и Ю.Г. Якушенкова. Российское агентство по системам управления. ОАО «Российская электроника», ОАО «Центральный научно-исследовательский институт «Циклон», 2000. Вып. 1. С. 116–121.
27. Колосов М.П. Оптическая система с концентрическим объективом // Оптико-механическая промышленность. 1986. № 4. С. 22–25.
28. Колосов М.П. Оптическая система с пространственным шарниром // Оптико-механическая промышленность. 1986. № 6. С. 13–16.
29. Колосов М.П. Оптическая система на основе концентрического объектива // Оптико-механическая промышленность. 1988. № 1. С. 26–28.
30. Колосов М.П. Оптическая система на основе коллиматора с кольцевым полем // Оптико-механическая промышленность. 1990. № 3. С. 30–31.
31. Колосов М.П. Пространственный оптический шарнир // Оптико-механическая промышленность. 1990. № 9. С. 78–82.
32. Колосов М.П. О методах исключения влияния нарушений в геометрической схеме угломерных приборов на их точность // Оптический журнал. 1992. № 3. С. 53–56.
33. Колосов М.П. О стабильности характеристик оптических элементов // Оптический журнал. 1992. № 4. С. 21–26.
34. Колосов М.П. О математическом моделировании нарушения геометрии угломерных приборов // Оптический журнал. 1992. № 5. С. 3–6.

35. Колосов М.П. Оптика адаптивных угломеров. М.: ООО «СКАН-1», 1997. 412 с.
36. Колосов М.П., Лысюк Ю.В. Анализ нерасстраиваемых оптических систем угломеров с неподвижной линией визирования // Оптический журнал. 1998. № 8. С. 61–65.
37. Кузьмин В.С., Федосеев В.И. Оптико-электронные приборы ориентации и навигации КА: опыт разработки, проблемы и тенденции // Оптический журнал. 1996. № 7. С. 4–9.
38. Лаврова Н.П., Стеценко А.Ф. Аэрофотосъемка. Аэрофотосъемочное оборудование. М.: Недра, 1981. 296 с.
39. Левшин В.Л. Пространственная фильтрация в оптических системах пеленгации. М.: Сов. радио, 1971. 200 с.
40. Левшин В.Л. Обработка информации в оптических системах пеленгации. М.: Машиностроение, 1978. 168 с.
41. Мартынов Д.Я. Курс практической астрофизики. М.: Наука, 1967. 544 с.
42. Мейтин В.А., Чернов В.С. Угломерный инструмент с квазиидеальной системой координат // Оптико-механическая промышленность. 1983. № 10. С. 45–47.
43. Миддлтон Д. Введение в статистическую теорию связи. Т. 2. М.: Сов. радио, 1962. 882 с.
44. Модель солнечного излучения / Сост. М.М. Гуревич. Л.: ГОИ им. С.И. Вавилова, 1979. 28 с.
45. Оружие и технологии России: Энциклопедия. XXI век / Под ред. С.Б. Иванова. Т. XI. Оптико-электронные системы и лазерная техника. М.: Издат. дом «Оружие и технологии», 2005. 719 с.
46. Осипик В.А., Саблин В.К., Федосеев В.И. Анализ способов учета искажений и нестабильностей раstra в оптико-электронных приборах с электронным сканированием // Оптико-механическая промышленность. 1978. № 8. С. 20–23.
47. Осипик В.А., Саблин В.К., Федосеев В.И. Анализ способов сканирования при измерении угловых координат точечного источника // Оптико-механическая промышленность. 1980. № 10. С. 8–11.
48. Осипик В.А., Федосеев В.И. Алгоритмы автоматического распознавания групп звезд на борту космического аппарата // Оптический журнал. 1998. № 8. С. 32–40.
49. Панасенко А.Ф., Кузьмин В.С., Карелин А.Ю. Использование рефракции звезд для ориентации и навигации КА // Оптический журнал. 1998. № 7. С. 27–29.
50. Пец Л.А. Некоторые результаты исследования световых помех, влияющих на работу звездных приборов космических аппаратов // Вопросы оборонной техники. Сер. X. 1973. Вып. 65. С. 12–17.
51. Пец Л.А., Федосеев В.И. Методы приближенных оценок защищенности приборов звездной ориентации и навигации КА от внешних источников световых помех // Оптический журнал. 1998. № 8. С. 9–21.
52. Пирогов М.Г., Федосеев В.И. Новое поколение оптико-электронных приборов ориентации КА // IV Междунар. конф. «Малые спутники. Новые технологии. Миниатюризация», 2004. г. Королев Моск. обл. Кн. 1. С. 112–127.

53. *Попков В.М.* Высокоточный инфракрасный прибор ориентации по Земле с использованием информации с двух параллельных траекторий сканирования // Оптический журнал. 1996. № 7. С. 54–55.

54. *Порфирьев Л.Ф., Смирнов В.В., Кузнецов В.И.* Аналитические оценки точности методов определения орбит. М.: Машиностроение, 1987. 280 с.

55. Проектирование оптико-электронных приборов: Учебник для вузов / Ю.Б. Парвулюсов, С.А. Родионов, В.П. Солдатов и др. Под ред. Ю.Г. Якушенкова. 2-е изд. М.: Логос, 2000. 488 с.

56. *Раушенбах Б.В., Токарь Е.Н.* Управление ориентацией космических аппаратов. М.: Наука, 1974. 600 с.

57. *Саблин В.К., Федосеев В.И.* Влияние размеров мгновенного поля зрения на эффективность поиска точечного объекта в системах с диссектором // Оптико-механическая промышленность. 1981. № 9. С. 3–4.

58. *Саблин В.К., Федосеев В.И., Хрусталева Л.В.* Об одном алгоритме двухэтапного поиска в диссекторных системах // Оптико-механическая промышленность. 1980. № 8. С. 7–9.

59. *Сергеевич В.Н., Кокшаров И.И., Эрме К.Э., Пельт Э.М.* Исследование рефракции и прозрачности земной атмосферы методом фотосъемки восхода и захода Луны с борта орбитальной станции // Исследование Земли из космоса. 1993. № 1. С. 67–73.

60. *Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г.* Инфракрасные системы «смотрящего типа». М.: Логос, 2004. 444 с.

61. *Федосеев В.И.* Анализ оптических сигналов матричными фотоприемниками // Известия вузов. Приборостроение. 1984. Т. 27. С. 70–79.

62. *Федосеев В.И.* Обнаружение пуассоновских полей // Проблемы передачи информации. 1979. Т. 15, № 1. С. 93–98.

63. *Федосеев В.И.* Оптимизация сканирования в системах анализа пуассоновских случайных полей // Автоматика и телемеханика. 1982. № 6. С. 117–125.

64. *Федосеев В.И., Широков Ф.В.* Обнаружение и оценка положения источника сигнала, модулирующего пуассоновское случайное поле // Известия вузов. Радиофизика. 1975. Т. 17, № 2. С. 246–252.

65. *Федосеев В.И., Широков Ф.В.* Пространственно-временная нелинейная фильтрация для пуассоновских случайных полей // Проблемы передачи информации. 1976. Т. 12, № 1. С. 29–40.

66. *Федосеев В.И., Карелин А.Ю., Короткова Е.Л.* Калибровка угломерных оптических приборов КА по результатам измерений координат звезд // Оптический журнал. 1995. № 9. С. 26–31.

67. *Черемухин Г.С.* Приборы ориентации на Солнце для космических аппаратов. М.: Воентехиниздат, 2004. 384 с.

68. *Черемухин Г.С., Чибисов В.А., Земляков В.А.* Космические прецизионные приборы ориентации по Солнцу // Оптический журнал. 1998. № 8. С. 80–82.

69. *Шестов Н.С.* Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех. М.: Сов. радио, 1967. 348 с.

70. *Якушенков Ю.Г.* Теория и расчет оптико-электронных приборов: Учебник. 5-е изд. М.: Логос, 2004. 472 с.

71. Якушенков Ю.Г., Луканцев В.Н., Колосов М.П. Методы борьбы с помехами в оптико-электронных приборах. М.: Радио и связь, 1981. 180 с.
72. Berrighi G., Landi A., Monnini E., Porcopio D. Space attitude sensors: new technologies using APS. OPTRO 2002 Symposium. Paris, 2002.
73. Fedoseev V.I., Kouzmin V.S., Medvedev B.V. Experimental researches on the scattered light in the optical system of the space vehicles star trackers, 3365-45 // Proc. SPIE. Acquisition, Tracking and Pointing XII. 1998. Vol. 3365.
74. Fender J.S. Stray radiation analysis programs (GUERAP III – ADART/PADE) // Radiation scattering in optical systems: Proc. Seminar, Huntsville, Ala (A81-36878 16-74) Bellingham, Wash, Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1981. P. 94–103.
75. Holst G.C. CCD Arrays, cameras and displays. SPIE Optical Engineering Press, Washington, 1998. 378 p.
76. Kolosov M.P., Eisurovich A.L. Distinctive features of making the wide-angle lenses of star trackers for attitude control of space vehicles // Proc. SPIE. 1997. Vol. 3086. P. 332–338.
77. Kouzmin V.S., Fedoseev V.I., Panasenko A.F. Light jummings and their suppression in the star trackers of space vehicle (3086-06) // Proc. SPIE. Acquisition, Tracking and Pointing XI. 1997. Vol. 3086. P. 25–29.
78. Kuzmin V.S., Fedoseev V.I., Zaekin V.I. New generation of star sensors. 2739-41 // Proc. SPIE. Acquisition, Tracking and Pointing X. 1996. Vol. 2739.
79. Kuzmin V.S., Cheremuhin G.S., Fedoseev V.I. Miniaturised sun sensor. 2739-42 // Proc. SPIE. Acquisition, Tracking and Pointing X. 1996. Vol. 2739.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Список сокращений	7

Глава 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРАХ ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

1.1. Задачи, решаемые ОЭП ориентации и навигации на КА	9
1.2. Основные типы приборов ориентации и навигации КА	12
1.2.1. Звездные приборы	15
1.2.2. Земные приборы ИК-диапазона	16
1.2.3. Солнечные приборы	18
1.2.4. Земные приборы видимого диапазона	20
1.3. Астроориентиры и оптические помехи для приборов ориентации и навигации КА	21
1.3.1. Звезды и помехи для звездных приборов	21
1.3.2. Земля и помехи для земных приборов ИК-диапазона	28
1.3.3. Солнце и Земля как астроориентиры приборов видимого спектрального диапазона	31

Глава 2

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ КА КАК УСТРОЙСТВА ПЕРЕРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

2.1. Основные правила проектирования информационных систем приборов ориентации и навигации КА	33
2.1.1. Правило разделения режимов работы	33
2.1.2. Правило соответствия пространственно-временной обработки и цели режима	35
2.1.3. Правило относительного измерения	39
2.2. Организация режимов работы в приборах ориентации и навигации КА	44
2.2.1. Режим измерения	44
2.2.2. Режим селекции рабочего источника	48
2.2.3. Режим поиска	56
2.2.4. Режим калибровки	60
2.3. Последовательность проектирования информационных систем приборов ориентации и навигации КА	64

Глава 3

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕЖИМОВ КАЛИБРОВКИ, ПОИСКА, СЕЛЕКЦИИ И ИЗМЕРЕНИЯ В ОЭП ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ КА

3.1. Принципы построения оптических систем для обеспечения режима калибровки. Оптика адаптивных угломеров	66
3.1.1. Нерасстраиваемые оптические системы с каналами геометрического эталона	71
3.1.2. Самокалибрующиеся и комбинированные оптические системы	87
3.2. Методы борьбы с оптическими помехами (для режимов поиска и селекции)	103
3.2.1. Методы подавления боковых помех в ОЭП	103
3.2.2. Использование априорной информации в режиме поиска системы солнечно-звездной ориентации	116
3.2.3. Оптическая селекция светящихся частиц по размеру их изображения	121

3.3. Особенности создания оптических систем широкопольных звездных приборов при обеспечении режимов измерения и поиска	122
3.3.1. Критерии качества объективов широкопольных звездных приборов	122
3.3.2. Методика расчета объективов широкопольных звездных приборов	124
3.3.3. Проектирование бленд широкопольных звездных приборов	127

Глава 4

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ОЭП ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ КА

4.1. Звездные ОЭП ориентации и навигации КА	130
4.1.1. Звездный прибор солнечно-звездной системы ориентации для межпланетных полетов	130
4.1.2. Помехозащищенный звездный прибор солнечно-звездной системы ориентации	134
4.1.3. Астровизирующий прибор с подвижным угловым полем	142
4.1.4. Прибор ориентации по Полярной звезде	150
4.1.5. Современные звездные приборы — измерители углов трехосной ориентации	156
4.2. Земные ОЭП ориентации и навигации инфракрасного диапазона	160
4.2.1. Датчики наличия Земли	160
4.2.2. Построители местной вертикали	162
4.2.3. Однокоординатные измерители угла отклонения	167
4.2.4. Двухкоординатные измерители угла отклонения	173
4.2.5. Приборы ориентации по Земле на основе многоэлементных приемников ИК-диапазона	176
4.3. Солнечные ОЭП ориентации и навигации КА	180
4.3.1. Датчики направления на Солнце грубые	180
4.3.2. Датчики направления на Солнце точные	183
4.3.3. Измерители угловых координат Солнца грубые	189
4.3.4. Измерители угловых координат Солнца точные	192
4.4. Земные ОЭП ориентации и навигации КА видимого диапазона	198

Глава 5

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ СТЕНДОВ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ ТОЧНОСТНЫХ ИСПЫТАНИЙ ОЭП ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ КА

5.1. Традиционные варианты построения стендов	206
5.2. Стенды на основе нерасстраиваемых и самокалибрующихся сканирующих систем	213

Глава 6

ИМИТАТОРЫ АСТРООРИЕНТИРОВ И ОПТИЧЕСКИХ ПОМЕХ ОЭП ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ КА

6.1. Имитаторы звезды и фона видимого диапазона	221
6.2. Имитаторы Земли	224
6.2.1. Имитатор Земли–атмосферы–космоса инфракрасного диапазона	224
6.2.2. Имитатор Земли видимого диапазона	230
6.3. Имитаторы Солнца	232
6.3.1. Имитаторы Солнца видимого диапазона	232
6.3.2. Инфракрасный имитатор Солнца (боковой помехи)	234
Заключение	237
Список литературы	241

Учебное издание

**ФЕДОСЕЕВ Виктор Иванович,
КОЛОСОВ Михаил Петрович**

**ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ
ОРИЕНТАЦИИ И НАВИГАЦИИ
КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Учебное пособие для вузов

Редактор-корректор *Т.М. Толмачева*
Компьютерная верстка *Ю.В. Одинцовой*
Оформление *Т.Ю. Хрычевой*

Подписано в печать 05.12.2007. Формат 60×90/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 15,5.
Тираж 1000 экз. Заказ № .

Издательская группа «Логос»
105318, Москва, Измайловское ш., 4

**По вопросам приобретения литературы
обращаться по адресу:**

105318, Москва, Измайловское ш., 4.
Тел./факс: (495) 369-56-68, 369-72-77.
Электронная почта: universitas@mail.ru

Дополнительная информация на сайте: <http://www.logosbook.ru>