Николаевская астрономическая обсерватория

Г.И.ПИНИГИН

ТЕЛЕСКОПЫ
НАЗЕМНОЙ ОПТИЧЕСКОЙ АСТРОМЕТРИИ

Учебное пособие

Николаев
2000

УДК 520.25 ББК 65.49 312

Печатается по решению Ученого Совета Николаевской астрономической обсерватории (Протокол № 9, от 21 декабря 2000 г.)

Рецензент: доктор физ-мат. наук Г.М.Петров

Пособие подготовлено и отпечатано на средства Николаевской астрономической обсерватории, а также при частичной финансовой поддержке Федеральной программы «Астрономия»

Пинигин Г.И. Телескопы наземной оптической астрометрии. Учебное пособие. — Николаев: Атолл, 2000. — 104 с.: илл. . ISBN 966-7726-14-2

В пособии показано техническое оснащение наблюдательного оборудования наземной оптической астрометрии. Приведено описание современных автоматических меридианных телескопов различных конструкций, телескопов-астрографов на параллактической монтировке, оснащенных ПЗС камерами Показаны методы исследования и определения положений небесных объектов в современных астрометрических программах, как на отдельных инструментах, так и посредством комплексов. Дана краткая информация о применении в наземной астрометрии метода интерферометрии в оптическом диапазоне на отдельных специализированных телескопах и их комплексах. Показаны предельные возможности наземных астрометрических инструментов.

Приведены сравнительные данные о планируемых на ближайшее время космических проектах с астрометрической тематикой.

Пособие рассчитано на студентов ВУЗов, аспирантов и научных сотрудников, а также лиц, самостоятельно изучающих современную астрономию и астрометрию.

УДК 520.25 ББК 65.49

ISBN 966-7726-14-2



©Г.И.Пинигин, 2000

© Николаевская астрономическая обсерватория, 2000

ПРЕДИСЛОВИЕ

История развития позиционной астрономии характеризуется постоянным стремлением повышения точности определения координат, что позволяет решать все более сложные задачи изучения геометрических, кинематических и динамических характеристик небесных объектов доступной части Вселенной. В предлагаемой книге, в виде учебного пособия приведен сжатый обзор технических средств современной позиционной астрономии. Изложены сведения о возможностях современных астрометрических инструментов: наземных автоматических меридианных кругов, ПЗС астрографов, оптических интерферометров и комплексов. Приведены данные о перспективных проектах. Показана тенденция создания каталогов положений небесных объектов с более высокими показателями по точности, количеству и яркости.

Небольшая историческая справка о путях повышения точности определения положений небесных объектов со времени Гиппарха (II-й век до н.э., около 30 угловых минут) до современной точности наземных оптических средств, типа автоматического меридианного круга (2000 г., порядка ±0."05) наглядно представляет, что за период в 2,2 тыс. лет прогресс в точности угломерных измерений в астрономии достиг почти пяти порядков. Только за последние 10-15 лет произошел переход к миллисекундной точности измерений (почти на два порядка!).

Наиболее ярко это проявилось в радиодиапазоне с помощью метода радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ), что послужило причиной появления новой области астрономии — радиоастрометрии. С 1.01.1998 года создана и принята к использованию международная небесная опорная система координат (ICRS - International Celestial Reference System), опирающаяся на положения 610 внегалактических радиоисточников (ERS), полученных методом РСДБ. Яркость оптических аналогов ERS порядка 17-21 звездных величин, а точность положений 0.25 миллисекунды (mas), т.е. 0."00025. Такая система координат обладает высокой стабильностью, поскольку базируется на положениях точечных внегалактических радиоисточников с пренебрежимо малыми собственными движениями, порядка 10^{-5} секунд дуги в год.

Прогресс современной космической техники позволил реализовать в 1989-93 гг. проект Hipparcos - High Precision PARallax Collecting Satellite. Успех первого космического эксперимента Hipparcos привел к созданию в 1997 году двух каталогов: а) Hipparcos каталог (HC), включающий 118 тысяч звезд до 10-й величины и точностью положений 0.77/0.64 mas дуги и 0.88/0.74 mas/год собственных движений по прямому восхождению и склонению, соответственно; б) Tycho каталог (TC), включающий один миллион звезд до 12-й величины с точностью 25 mas. По сравнению с традиционными наземными определениями в существенно короткие сроки достигнуто почти 100-кратное увеличение точности по пяти астрометрическим параметрам (положения, собственные движения и параллакс) значительного количества звезд.

Наземная оптическая астрометрия, имея ранее консервативный имидж, за последние годы активно внедряет новую технику. Можно отметить применение полупроводниковых панорамных приборов-приемников с зарядовой связью (ПЗС), введение режима полной автоматизации наблюдений, по существу, роботизации телескопов, использование глобальных информа-

ционных сетей, лазерных (CD-ROM) дисков для хранения огромных массивов наблюденных данных и др. Благодаря этому наземная астрометрия оперирует точностными данными на микросекундном уровне.

Сегодня можно говорить о смене эпох развития позиционной астрономии: меридианная астрометрия заменяется, а точнее дополняется радиоастрометрией и космической астрометрией, вместо методики абсолютных позиционных определений используются дифференциальные (относительные) определения, достигнутая совсем недавно стадия миллисекундной точности переживает процесс активного освоения и перехода к начальной стадии микросекундной точности. Под влиянием этих и других факторов задачи наземной астрометрии существенно изменились даже на ближайший, так называемый, Пост-Гиппаркос период.

В предлагаемом учебном пособии сделана попытка рассмотрения роли наземных астрометрических наблюдений на фоне программ современной астрономии. Показано, что наземные телескопы позволяют выполнять современные программы позиционной астрономии на достаточно высоком, предельном для наземной астрометрии уровне возможностей, что определяет их существенный вклад в сочетании с методами космической астрометрии и радиоастрометрии. В книгу включены в достаточно подробном описании избранные телескопы - представители меридианных кругов трех типов (классический, зеркально-линзовый и горизонтальный) и астрографы, наиболее известные в позиционной астрономии и примеры их эффективной работы благодаря применению новейших технических разработок. Об использовании новых наземных средств в позиционной астрономии (оптические интерферометры и их комплексы, большие телескопы) сказано фрагментарно, ввиду ограниченности курса по времени и объему, а также возможности получения свежей информации об этих новейших телескопах из Интернета. Литературные источники, приведенные в конце книги, малодоступны широкому кругу читателей и отстают по времени опубликования.

В заключение автор приносит благодарность Р.И.Гумерову за предоставление материала о новом телескопе АЗТ-22, соавторам (М.Б.Игнатьеву, А.Н.Ковальчуку, В.В. Никифорову, Ю.И.Процюку, А.В.Шульге, О.Е.Шорникову и др.) ряда статей, содержание которых использовалось при создании текста пособия. Автор весьма признателен рецензенту Г.М.Петрову за ряд ценных советов и замечаний, позволивших улучшить изложение материала.

Автор выражает свою благодарность сотрудникам и организациям имеющих на своих INTERNET-сайтах изображения телескопов и другой информации, которая была в разной степени использована в настоящем учебном пособии для более наглядного представления и иллюстрации тех или иных разделов (исключая коммерческие цели).

ВВЕДЕНИЕ

Астрометрия — древнейшая и основная часть астрономии, положила начало всей астрономии. Астрометрия — это наука о методах определения положений небесных объектов в разные эпохи и анализе их изменений, связанных с движением Земли в пространстве. Более точно определение астрометрии можно сформулировать как науки, которая на основе получения координат небесных светил и изучения движения Земли создает систему координат в виде фундаментального каталога положений и собственных движений и согласованного комплекса значений фундаментальных постоянных астрономии (прецессии, нутации, аберрации, параллаксов).

Одной из основных задач астрометрии является создание системы небесных координат (СК), обладающей только прямолинейным и равномерным движением, в которой начало координат связано с барицентром Солнечной системы. К настоящему этапу развития астрономии сложилось несколько реализаций СК, строго говоря, условных: звездная (фундаментальная - FK5), планетная (динамическая - DE403), внегалактических радиоисточников (ICRF - по РСДБ наблюдениям), космическая (HCRF-по наблюдениям с космического аппарата Hipparcos). Они существенно различаются по методам измерений и точности опорных каталогов положений и собственных движений. Поскольку современные требования фундаментальных и прикладных исследований в астрономии и других смежных областях науки к точности построения различного вида СК и их взаимной связи близки к значению 0."001, т.е. 5 x 10^{9} рад. или 3 см на поверхности Земли, то с 1.1.1998 г. в соответствии с Резолюцией XXIII Генеральной ассамблеи МАС (Киото, 1997 г.) была принята в качестве опорной новая СК - ICRS (International Celestial Reference System) - международная небесная опорная система координат. Новая система координат ICRS в отличие от прежней (фундаментальный каталог FK5) не связана с вращением Земли и ее обращением вокруг Солнца, а направление ее осей базируется на 610 точечных внегалактических радиоисточниках, определенных методами РСДБ наблюдений и имеющих яркость своих оптических аналогов 17-21 величин и точность положений около 0.2 - 1 mas. Эта первоначальная реализация 1CRS получила название ICRF (International Celestial Reference Frame) - международная небесная опорная система отсчета. Ориентация ICRF в пространстве близка к фундаментальной системе FK5 на эпоху J2000.0; высокая стабильность определяется пренебрежимо малыми, порядка 10^{-5} сек. дуги в год, собственными движениями внегалактических радиоисточников ERS. Однако при всех своих достоинствах ICRF имеет и недостатки: 1) базируется на радиоисточниках - объектах, невидимых в оптическом диапазоне; 2) имеет неравномерное и малое количество весьма слабых объектов (один радиоисточник на 100 квадратных градусов); 3) не исключена возможность несовпадения координат объектов в радио и видимом диапазонах длин волн; 4) необходимо иметь для реального использования этой системы координат ее представление в оптическом диапазоне с такой же точностью, в виде звезд большей яркости, чем оптические аналоги радиоисточников.

Учитывая вышеизложенное, для практического использования замечательных свойств ICRF ее необходимо расширить на яркие звезды, сохраняя при этом высокую точность их положений. С появлением каталога Hipparcos (HC) миллисекундного уровня точности он был принят в качестве опорной системы

отсчета в оптическом диапазоне HCRF (Hipparcos Catalog Reference Frame), опирающейся на звезды 10-12 величин (Резолюция XXIV Генеральной ассамблеи МАС, Манчестер, 2000 г.). Для устранения влияния собственных движений звезд НС необходимо поддерживать его точность на первоначальном уровне, а также улучшать связь HCRF с ICRF.

Существующие методы связи радио (ICRF) и оптических систем отсчета (динамической, космической и др.) с разностью, примерно, в 10 звездных величин позволяют решить эту задачу путем их ступенчатой привязки через промежуточные СК, используя наземные астрометрические телескопы (автоматические меридианные телескопы, широкоугольные астрографы, большие оптические телескопы), наблюдения с космического аппарата Hipparcos, телескопа Хаббла и будущих КА - DIVA, FAME, GAIA и др.), средства и методы РСДБ для измерения положений радиозвезд и ERS и др. Имеются методы и возможности непосредственной привязки различных систем отсчета к ICRF, исключая таким образом промежуточные ступени и повышая окончательную точность связи.

***

Развитие астрометрии существенно зависит от возможности техники - изменение точности определения координат небесных объектов особенно за последние несколько столетий это наглядно иллюстрирует (см. табл. 1 и рис.1) История астрометрии характеризуется постоянным стремлением повышения точности определения координат небесных объектов, что позволяет решать все более и более сложные задачи. Развитие современной техники, в частности, космической, позволило реализовать в 1989-93 гг проект HIPPARCOS. Результаты обработки наблюдений с этого спутника повысили точность определения координат и других астрометрических параметров (собственных движений, параллакса) примерно в 100 раз по сравнению с точностью традиционных наземных наблюдений. Все это послужило причиной коренных изменений и колоссального прогресса, как в традиционной позиционной астрономии, так и вообще в астрономии по множеству направлений исследований. В частности, можно говорить о смене эпох развития позиционной астрономии: эпоха наземной меридианной астрометрии заменяется эпохой космической астрометрии.

Первым каталогом, имеющим приемлемую точность (около 30' в положениях звезд) и научную ценность считается каталог Гиппарха (100 лет до н.э.). С его помощью Гиппарх открыл прецессию. Позже Птолемей (90--160г. н.э.), используя вавилонские наблюдения с 8 века до н.э. по 141 г. н.э., а также наблюдения Гиппарха и свои с армиллярной сферой вывел первый сводный каталог Альмагест, содержащий 1028 звезд и имеющий точность около 15'. В средние века с квадрантами и диоптрами была получена точность порядка 1 -2 угловых минут. Был достигнут уровень разрешения невооруженного глаза (каталоги положений звезд Улугбека (15 в.), Тихо Браге (16 в.), Гевелия(17в.)).

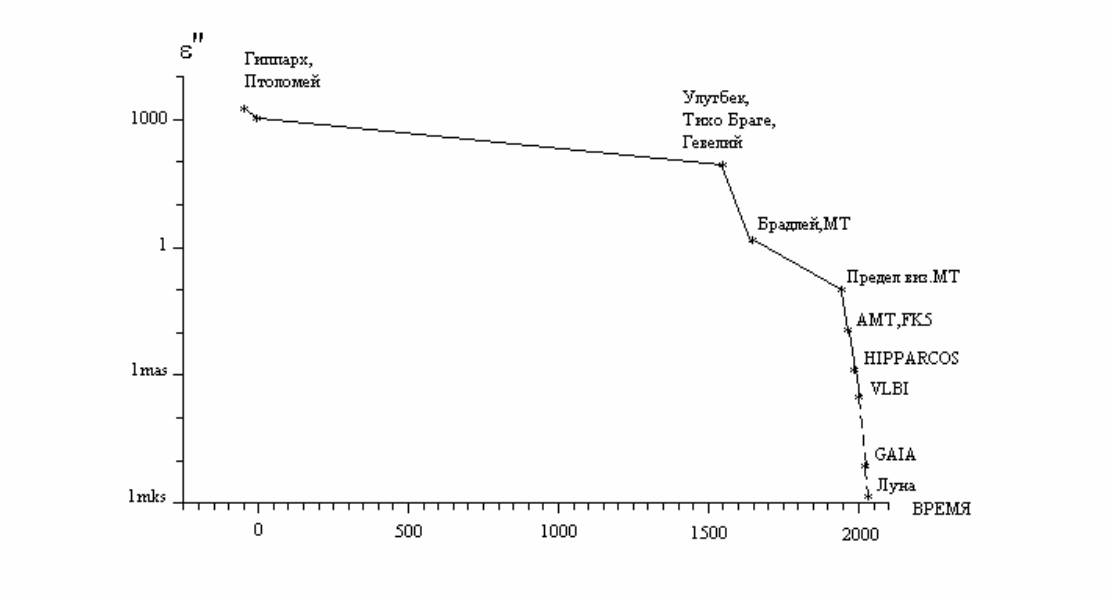

Рис.1. Повышение точности позиционных измерений в астрономии обусловленное развитием техники

Увеличение точности примерно в 100 раз (до 1"-2") произошло после создания Галилеем в 1612 году телескопа, а датским астрономом Ремером в 1689 году прототипа пассажного инструмента, позже (Дж. Брадлей, Т.Майер) и меридианного телескопа (МТ) - меридианного круга. Было изобретено также П.Вернье устройство для точного отсчета круга (верньер), а Гюйгенсом - маятниковые часы. Лучшие каталоги Флемстида и Брадлея имели уже точность 1". Это результат перехода от наблюдений с диоптрами к наблюдениям с МТ.
В 18-19 вв. в астрометрии используются результаты технической революции - электричество, радио, спектральный анализ - создается контактный регистрирующий микрометр, пишущий хронограф, высокоточные часы; разрабатывается Т.Майером и Ф.Бесселем теория ошибок меридианного телескопа. Лучшие визуальные МТ того времени показывали точность 0."2-0."4.

В результате последующих усовершенствований в XX веке (применение фотоэлектрического и ПЗС метода регистрации звезд, использование кварцевых и атомных стандартов времени и частоты, новых материалов - ситалла, титана; ЭВМ и полной автоматизации наблюдений, внедрение МТ новых конструкций и др.) точность наземных наблюдений подошла вплотную к рефракционному пределу. Точность лучших современных, автоматических МТ достигла уровня О. "05 и выше, при этом возможное количество объектов наблюдений достигает сотен тысяч в год, а предельная яркость до 17-18 звездной величины (см. табл.1). Оптимистические прогнозы предельной точности наземных меридианных телескопов, с учетом современной инструментальной точности измерений (0.01 мкм), максимальном учете влияния аномалий рефракции, эффектов движения полюса и колебаний линии отвеса оцениваются величиной порядка 0."0l (десять угловых миллисекунд).

Дальнейшие перспективы повышения точности наземными средствами связаны с применением новых методов и приборов оптической и радиоинтерферометрии, а также космических средств с орбитального космического аппарата или Луны. Уровень точности в этом случае: от угловой миллисекунды до нескольких микросекунд.

*Табл.1.*НАЗЕМНЫЕ МЕРИДИАННЫЕ ТЕЛЕСКОПЫ.

Инструмент	Точность наблюдений	Количество небесных объектов	Предельная яркость (mag)	Эпоха наблюдений
Лучшие каталоги	2' (RA и D)	1 534 звезд	6	1661-1701 гг.
Первые каталоги с МТ	2."2; 1."3	3268	6-7	середина XVIII в.
Лучшие визуальные МТ	0"21;0."38	Тысячи/год	9	середина XX в.
Автоматические МТ	О."16; 0."17	Дес.тыс./год	13-15	1980гг.
ПЗС автоматические меридианные	0"01-0."05,	Сотни тысяч и млн. в год	17-18	1990гг.

Г Л А В А 1

ПРОБЛЕМЫ И ОГРАНИЧЕНИЯ НАЗЕМНОЙ АСТРОМЕТРИИ

1.1. Возможности наземных методов определения координат.

За время существования астрометрии использовались различные методы определения координат небесных объектов. В настоящее время за геометрическую основу на небесной сфере принята экваториальная система координат, которая задана плоскостью небесного экватора и точкой весеннего равноденствия, т.е. определяется вращением Земли вокруг своей оси и ее движением вокруг Солнца. Из широкой группы методов определения экваториальных координат (метод равных высот, азимутальный способ, метод дуг, меридианный метод и др.) наиболее детально разработан и получил широкое распространение в наземной астрометрии меридианный метод.

Суть меридианного метода заключается в регистрации меридианным телескопом прохождений звезд через плоскость небесного меридиана, положение которой определяется отвесной линией и осью мира (осью вращения Земли). Соответственно и МТ ориентируется относительно меридиана и отвесной линии с минимальными и определяемыми отклонениями. Не вдаваясь в подробное изложение теории меридианного способа, поскольку этому посвящен отдельный курс по фундаментальной астрометрии, отметим его некоторые особенности. Достоинства меридианного способа общеизвестны - независимое и относительно простое определение обеих координат, минимальное и практически постоянное влияние рефракции за время регистрации прохождения небесных обьектов через плоскость меридиана, облегчено достижение максимально точной ориентировки МТ относительно меридиана и отвесной линии и др. Принципиальные недостатки меридианного метода заключены в ошибках определения положения небесного экватора и отвесной линии. Дело в том, что предельная точность метода, порядка 0.″01-0.″02, обусловлена с одной стороны нестабильностью положения оси вращения в теле Земли (изменяемость широт от среднего достигает 0.″3). Причиной этой нестабильности являются движения полюсов Земли с 14-ти месячным периодом Чандлера из-за пластичности Земли и годовым периодом, связанным с сезонными изменениями в атмосфере Земли. Однако с появлением новых методов определения параметров вращения Земли (РСДБ, лазерная локация Луны и ИСЗ, GPS) точность определения координат полюса, а следовательно и положения небесного экватора повысилась до 1-3 см или 0.″001 в угловом отношении. С другой стороны положение отвесной линии в пункте наблюдения также изменчиво и зависит от распределения масс в теле Земли, приливных явлений от Солнца, Луны. Уклонения линии отвеса могут достигать 0.″1; в том числе приливные явления от Луны вызывают уклонения до 0.″017, от Солнца, порядка 0.″008. При точных астрометрических наблюдениях необходимо и возможно учитывать уклонения линии отвеса с максимальной точностью.

Что касается других методов, то их возможности более ограничены. В случае метода равных высот - это ограниченная зона склонений, переменное

влияние рефракции в разных азимутах и инструментальных ошибок. Азимутальный метод применим лишь в первом вертикале. А метод дуг в наземных условиях подвержен значительному влиянию ошибок рефракции и применим лишь на полусфере, но в космических условиях он вне конкуренции. В настоящее время этот метод является основным в космической астрометрии, получив реальную проверку при обработке наблюдений проекта Hipparcos.

В итоге, среди наземных методов наиболее удобным и применимым остается меридианный метод в дифференциальном исполнении. Это позволяет использовать все преимущества астрометрии малых полей, т.е. существенно уменьшить влияние рефракции, увеличить количество наблюдаемых объектов, а учитывая современные возможности геодинамики предельная точность меридианного метода по некоторым оценкам может быть доведена до уровня, порядка, 0. ″005.

1.2. Инструментальные проблемы.

Наземные наблюдения традиционным меридианным способом в до-Hipparcos время использовались достаточно интенсивно. В докладе Комиссии №8 к 22-му сьезду МАС в Гааге (1994г.) отмечено 20 действующих меридианных телескопов из 13 стран. Однако наиболее эффективно в последнее время работают лишь семь автоматических МТ в США, Японии, Франции, на Канарских островах (в рамках европейского сотрудничества). В СНГ из равноценных инструментов можно отметить лишь николаевский Аксиальный меридианный круг - АМК.

Рассмотрим современный уровень точности МТ. Уменьшению влияния ошибок МТ всегда уделялось большое внимание. К настоящему времени технические возможности обеспечивают точность реальных измерений инструментальных параметров на уровне 0.01 микрона, что составляет в угловой мере, около 0."001 при фокусных расстояниях МТ, порядка 2-3 метров. Однако, систематические разности вида (Cat-FK5) по склонению, полученные на лучших автоматических МТ классической конструкции (CAMC, PMC, Bordeaux MC, пулковский ГМК и АМК) показывают большие расхождения, до 0."1 (см. рис. 1.1, 1.2). При этом реальная точность разностей для единичного МТ составляла 0."02-0."03 при точности FK5 около 0."04. Также отмечены заметные годовые изменения разностей (Cat-FK5). Например, для PMC внутри трехлетнего цикла наблюдений они составляют 0."05-0."1. В итоге, несмотря на хорошее согласие систематических ходов разностей по склонению, обусловленных систематическими ошибками FK5 можно отметить их нестабильность и несовпадение для отдельных МТ.

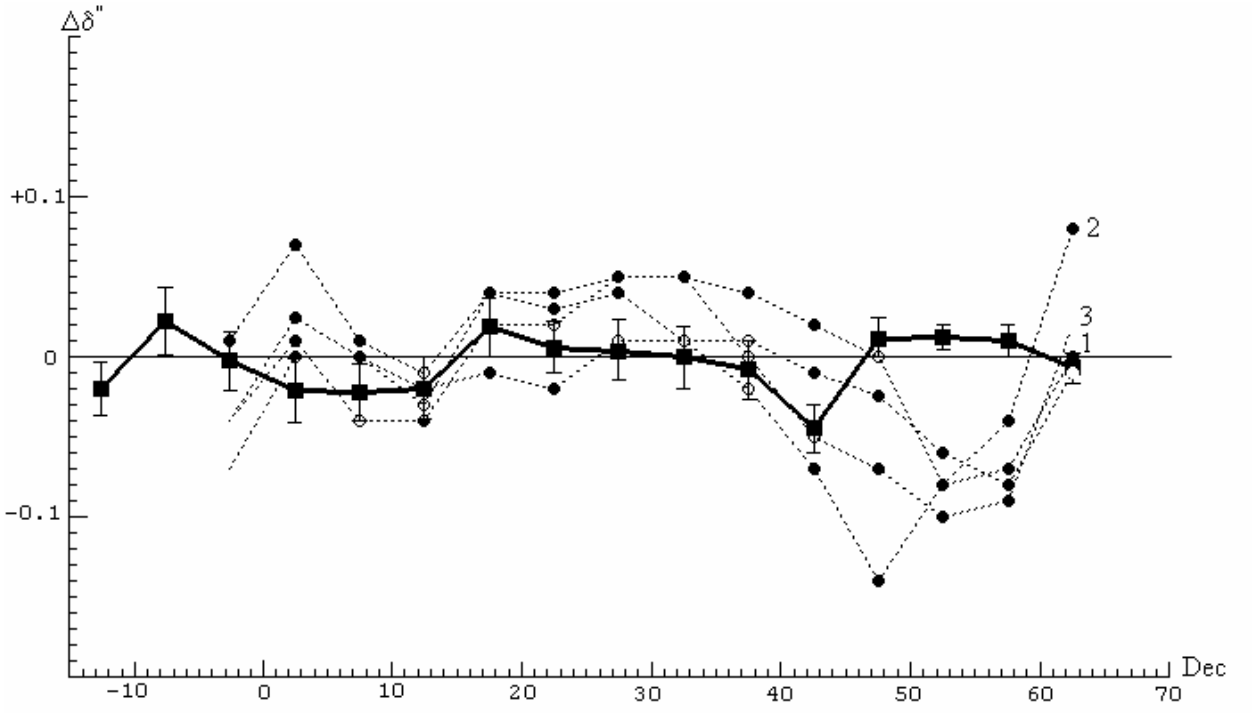

Рис. 1.1. Сравнение средних систематических разностей вида $(O\text{-}C)_\delta$
в смысле (каталог- FK5) для САМС (1), Бордо МК (2), РМС (3),
ГМК (4), АМК (5)

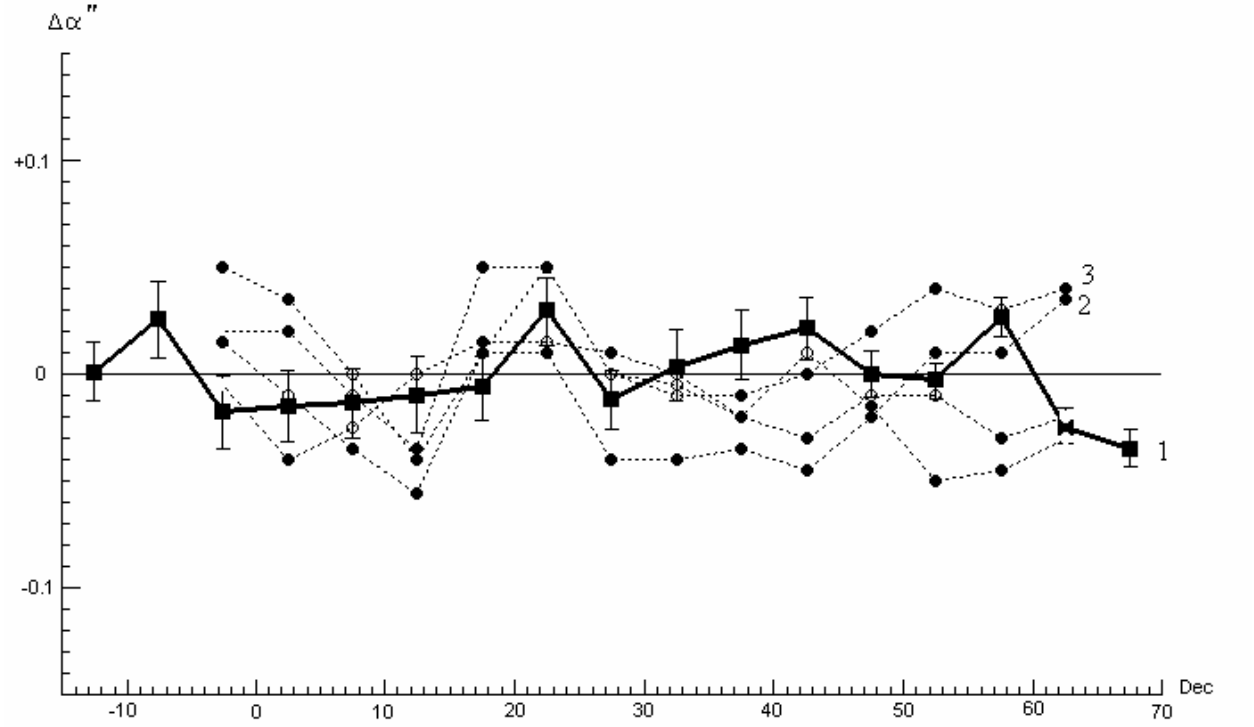

Рис. 1.2. Сравнение средних систематических разностей вида $(O\text{-}C)_\alpha Cos\delta$
в смысле (каталог- FK5) для САМС (1), Бордо МК (2), РМС (3),
ГМК (4), АМК (5)

Для объяснения этих разногласий рассмотрим такие инструментальные параметры, как гнутие и коллимацию. Известно, что эти параметры влияют, главным образом, на определение склонений (гнутие) и прямых восхождений (коллимация). В табл.1.1 показаны абсолютные значения и изменения с температурой горизонтального гнутия и коллимации для меридианных телескопов различных конструкций.

Табл.1.1. Сравнение ошибок меридианных телескопов различных конструкций.

Конструкция меридианного телескопа	Величина горизонтального гнутия	Изменение гнутия / 1^oC	Изменение коллимации / 1^oC
Классическая: PMC, CAMC, BrdMC, FASTT	1″ - 1.″5	0.″05 - 0.″69	0.″1 - 0.″25
Зеркально-линзовая	2. ″2 - 1. ″8	0. ″65	-
Горизонтальная в меридиане: пулковский ГМК МАГИС	0. ″01 - 0. ″02 0. ″01*	- -	0. ″004 - 0. ″005 0. ″02
Горизонтальная в 1-м вертикале: николаевский АМК, китайский DCMT	0. ″037 0. ″02	- -	0. ″026 0. ″07

* ожидаемое значение

Анализируя известные меридианные астрометрические инструменты можно выделить четыре основные группы МТ, в зависимости от их оптико-механических конструкций. Детальное описание некоторых МТ - представителей каждой группы приведено в главах 2-5. Здесь же отметим лишь принципиальные особенности и различия между МТ этих групп.

В первую группу включен известный, распространенный еще со времен Ремера и Струве астрометрический инструмент - рефрактор, использовавшийся обычно в виде пассажного инструмента, вертикального круга и меридианного круга. Еще 50 лет назад насчитывалось около сотни МТ классической конструкции, принимавших участие в астрометрических наблюдениях. В настоящее время не более десяти МТ такого типа имеют высокий технический уровень и участвуют в современных программах. Симметрия оптико-механической конструкции, простота наблюдений и теории инструмента, универсальность и длительный опыт его применения, разработанные и испытанные методы по исследованию инструментальной системы послужили основой для современной модернизации некоторых и создания новых МТ, которые работают в настоящее время. Однако элементы конструкции классического МТ имеют значительные весовые и термические деформации,

хроматизм и поглощение в оптической системе, нестабильность параметров и др.

Во вторую группу включен более поздний по разработке и изготовлению зеркально-линзовый МТ. По своей конструкции такой инструмент близок к МТ первой группы, поскольку имеет подвижную, вращающуюся часть: горизонтальную ось с разделенными кругами и трубу с окулярным микрометром. Отличие в том, что труба зеркально-линзового телескопа в несколько раз короче трубы рефрактора и, следовательно, может быть улучшена жесткость и уменьшены весовые нагрузки трубы. Конструкция обладает симметрией, компактна, проста и удобна в обращении. Зеркальная оптическая система ахроматична, остальные аберрации значительно уменьшены. Из главных отрицательных свойств можно отметить удвоение ошибок, связанных с отсчетами разделенных кругов, с неправильностью цапф и отражающей поверхности вследствие применения в оптической схеме телескопа зеркала.

Начиная с конца прошлого века были начаты попытки астрометрического использования горизонтального телескопа - сидеростата с одной или двумя горизонтальными трубами в меридиане (третья группа МТ). В этой конструкции перед объективом неподвижной трубы (или двух труб) расположено плоское зеркало с осью вращения в первом вертикале. Вращением вокруг горизонтальной оси зеркало устанавливается таким образом, чтобы изображение объекта наблюдений поступало на регистрирующий окулярный микрометр. Горизонтальный МТ имеет значительные преимущества за счет неподвижности трубы - практически устранено влияние гнутия трубы, повышена устойчивость телескопа за счет увеличения фокусного расстояния трубы, упрощен контроль за поведением параметров инструмента. Из принципиальных недостатков следует отметить удвоения влияния ошибок вследствие применения в оптической схеме телескопа зеркала.

В четвертой группе представлен МТ с горизонтальной трубой в первом вертикале. В этой конструкции оптический узел в виде зеркала, призмы или куба передает изображение звезды в трубу и далее на окулярное регистрирующее устройство. Оптический узел может быть либо жестко связанным с трубой и вращаться вместе с ней вокруг горизонтальной оси (аксиальная схема), либо быть несвязанным с трубой и вращаться без нее, которая в этом случае неподвижна. Через отверстие в оптическом узле окулярный микрометр телескопа может в процессе наблюдений дополнительно регистрировать положение световой марки неподвижного, удаленного коллиматора. Из достоинств этого МТ можно отметить более определенное положение трубы МТ, за счет привязки к устойчивому, удаленному коллиматору (мире), отсутствие гнутия (кроме деформаций оптического узла), отсутствие удвоения ошибок лимба, зеркала; используется лишь одна труба. Однако, высоки требования к стабильности геометрических характеристик оптического узла, а также жесткости системы труба-зеркало при их совместном вращении.

Из табл.1.1 можно видеть, что значения параметров гнутия и коллимации для МТ классической конструкции намного больше, чем для МТ горизонтальной конструкции. В частности, можно отметить, что изменения гнутия и коллимации с температурой очень малы для горизонтальных МТ в первом вертикале. Это имеет большое значение для стабильности

инструментальной системы. Как результат, систематические разности (Cat-FK5) николаевского АМК показали высокую стабильность и точность, около 0."02 -0."03 (Рис.1.1, 1.2). К тому же следует учесть, что материал на АМК получен по меньшему числу наблюдений, чем на других МТ. Вполне очевидно, что систематические разности (Cat-FK5) МТ классической конструкции включают остаточные ошибки гнутия и коллимации. Высокие результаты горизонтальных МТ в первом вертикале определяются постоянным измерением положений звезд относительно опорного направления коллиматора, что позволяет исключить смещения трубы и получить более стабильную ориентировку инструмента. Вследствие этого, уровень систематических ошибок для этого типа МТ может быть уменьшен до уровня 0."01-0."02. Первые результаты наблюдений в 1996-98 гг. на николаевском АМК подтверждают это.

Очень важный этап в астрометрии, включая меридианную, начался после замены регистрирующих устройств, использующих фотоумножители на полупроводниковые приборы с зарядовой связью (ПЗС), когда появилась возможность с более высокой точностью и эффективностью определять положения, параллаксы и собственные движения звезд, тел Солнечной системы, внегалактических объектов. Благодаря высокой квантовой эффективности, широкому динамическому диапазону и малому уровню шумов точность ПЗС измерений положений звезд на матрице возможна до 1-2 процентов пикселя, а точность фотометрирования достигает 0.03 звездных величин. Отсюда следует значительное повышение точности определений положений наблюдаемых объектов и возможность наблюдения более слабых объектов. Действительно, с ПЗС микрометром на МТ во Флагстаффе (США) была достигнута предельная звездная величина 18.3 (V). ПЗС камеры установлены также и на автоматических МТ в Токио, Бордо, Канарских о-вах.

Для измерения положений звезд на ПЗС матрице используется, главным образом, способ дрейфового сканирования с накоплением (drift-scan), который позволяет вести наблюдения длинными полосами при неподвижном МТ и ПЗС приемнике, в то время как изображение звезды суточным движением пересекает матрицу. При дифференциальном способе наблюдений для регистрации достаточного числа опорных звезд длина полосы достигает двух и более часов. При наблюдении неподвижных объектов или использовании телескопа с часовым приводом используется кадровый режим (stare mode). Положения определяемых звезд измеряются относительно опорных из наиболее точных и многочисленных каталогов, таких как HC, TC-2, USNO-A2.0. Впрочем, первый из-за своей малочисленности можно использовать лишь при длинных полосах. Однако, изменения инструментальных параметров и атмосферной рефракции будут деформировать длинную полосу по прямому восхождению и склонению. Для учета инструментальных ошибок из-за смещения телескопа и ПЗС матрицы используется лазерная система контроля. На горизонтальном МТ, имеющем возможность наблюдений звезд одновременно с автоколлимационными измерениями без изменения установки трубы по зенитному расстоянию использование метода наблюдений полосами наиболее эффективно.

С появлением ПЗС матриц стало возможным выполнение массовых наблюдений небесных объектов при обязательном наличии системы программного управления МТ (СПУ). Обычно СПУ реализуется на базе двух

компьютеров: основного, который установлен в служебном помещении и управляющего. СПУ используется для управления всеми устройствами телескопа (окулярный ПЗС звездный микрометр, ПЗС микрометр коллиматора, система отсчета круга и наведения телескопа, устройства точного времени, система сбора метеоданных), проведения инструментальных исследований и определения параметров телескопа, подготовки к наблюдениям, выполнения автоматических (по программе) наблюдений небесных объектов в различных режимах, для первичной обработки данных, отображения и сохранения полученных данных. Программное обеспечение СПУ на управляющем компьютере предусматривает: определение параметров телескопа и тестирование его узлов; автоматическое выполнение наблюдений при различных режимах работы регистрирующих устройств и по различным наблюдательным программам; первичную обработку и сжатие получаемой информации; графическое отображение поступающей с регистрирующих устройств информации; возможность гибкой настройки до и во время проведения наблюдений; передачу полученной информации на основной компьютер. СПУ установленная на основном компьютере отвечает за: автоматическую подготовку данных для последующих наблюдений с учетом ночных условий наблюдений и накопленного материала при использовании различных входных каталогов; автоматическую первичную обработку данных наблюдений после ее получения от СПУ управляющего компьютера и включающую: цифровую фильтрацию ПЗС изображений, отождествление всех наблюденных объектов и определение их координат в системе координат ПЗС звездного микрометра, определение координат коллимационных меток и отсчетов лимба в системе координат регистрирующих устройств; накопление информации для последующей полной обработки; накопление статистической информации для использования при подготовке к наблюдениям, а также ее хранение. Внедрение автоматизации АМК на базе представленного СПУ позволило: сократить количество наблюдателей, существенно увеличить производительность наблюдений, более эффективно распределять наблюдательное время; получать статистически однородный наблюдательный материал не связанный с конкретным наблюдателем; автоматически изменять режимы работы узлов телескопа в зависимости от условий наблюдений.

Производительность программно-управляемого МТ с ПЗС достаточно высока: около 9000 звезд можно наблюдать в час на МТ во Флагстаффе и до 7500 звезд на МТ в Токио. В новых программах для ПЗС МТ планируется получение до миллиона наблюдений звезд в год!

В итоге, посредством автоматического МТ технически возможны измерения на уровне 0.01 мкм, что позволяет ожидать в перспективе угловой точности в диапазоне 0.″005 - 0.″001.

Реально достигнутая точность в настоящее время - на порядок ниже.

1.3. Приемники света.

Использование в астрономии объективных методов регистрации, типа фотографического (с прошлого века) и фотоэлектрического (с 1930-х годов) практически заменено на применение панорамных приемников типа ПЗС. В настоящее время ПЗС приемниками оснащено большинство астрофизических и астрометрических телескопов.

В 1969 году в США был изобретен полупроводниковый панорамный светочувствительный прибор - прибор с зарядовой связью (ПЗС) или в распространенной, английской терминологии “charge coupled device (CCD)”. ПЗС обладает существенными преимуществами перед фотопластинкой и фотоумножителем: наблюдения более слабых объектов и в разных режимах (сканирование, накопление, комбинированный метод), широкий динамический диапазон, цифровое представление материала наблюдений, что позволяет использовать различные методы обработки данных и повышает в конечном итоге точность.

В основу работы ПЗС камеры положен принцип использования ПЗС приемника в режиме синхронного накопления при перемещении регистрируемых объектов в поле зрения телескопа и в кадровом режиме при наблюдении неподвижных звезд когда угловое перемещение трубы телескопа производится со скоростью суточного вращения Земли.

1. Кадровый режим. В этом режиме в течение установленного программой времени выполняется накопление зарядовых пакетов с дальнейшим быстрым считыванием информации. Диапазон возможных экспозиций лежит в пределах от десятков миллисекунд до десятков минут и ограничен только величиной фонового и темнового сигналов. Указанный режим используется для наблюдения неподвижных и малоподвижных объектов, а также для отсчета инструментальных световых меток, которые контролируют стабильность системы инструмента в процессе наблюдений.

2. Режим накопления с синхронным переносом зарядовых пакетов. В этом режиме накопление выполняется одновременно с переносом зарядовых пакетов. Скорость переноса зарядовых пакетов вдоль столбцов матрицы равняется скорости перемещения изображения наблюдаемого объекта в плоскости матрицы. Режим используется для регистрации движущихся изображений. В этом режиме угловой размер полученного изображения по склонению определяется линейным размером ПЗС матрицы, а по прямому восхождению устанавливается программно и ограничен только продолжительностью ночного времени.

ПЗС регистрирующее устройство (камера) предназначается для определения звездных величин в определенной фотометрической системе и координат симметричных и несимметричных объектов в прямоугольной системе координат, что задается направлением столбцов и строчек матрицы. В качестве примера характеристики матрицы ISD017A производства НПП “Электрон-Оптроник”, г. Санкт-Петербург приведены в табл. 1.2.

Табл.1.2. Паспортные данные матрицы ISD017 НПП “Электрон-Оптроник”.

Матрица	ISD017
Число элементов (H x V)	1040×1160
Организация изделия	SFF
Размер пиксела (mkm)	16×16
Фоточувствительная площадь (mm)	16.6×18.6
Заряд насыщения (тыс. эл)	130
Шум считывания однокаскадного выхода (эл.)	2
Темновой сигнал @ - 40°C (эл./яч./с)	2

Квантовая эффективность, %	@ 400 nm @ 750 nm @ 1100 nm	25 60 25
Неэффективность переноса заряда		$<10^{-5}$

В настоящее время известно достаточно много различных типов зарубежных CCD, например, в России известны ПЗС матрицы типа ST-6, -7, -8 производства Santa Barbara Instrumentation Group, матрицы типа Loreal, Kodak и др.

Для обработки ПЗС изображений небесных объектов существует большое количество программных пакетов и систем как общего назначения типа MIDAS, IDL, Astrometrica и др., так и отдельных программ, разработанных почти в каждой обсерватории. Полный алгоритм обработки изображения обычно включает в себя коррекцию геометрических искажений поля, цифровую фильтрацию, удаление постоянной составляющей сигнала, вызванной фоновой подсветкой и темновым сигналом ПЗС матрицы, определение центра изображения различными моделями аппроксимации и др. При обработке изображений учитываются особенности сигнала с ПЗС матриц, работающих в разных режимах (кадровый и синхронное накопление). Также предоставляется возможность выполнения астрометрической редукции методом шести и более постоянных при определении координат небесных объектов и вычисления звездных величин с использованием наиболее точных каталогов опорных звезд.

1.4. Рефракционный барьер.

Влияние рефракции является другой важной проблемой для наземной астрометрии, где выполняются измерения больших углов на небесной сфере. В общем, рефракцию можно разделить на нормальную (табличную) и аномальную. Точность учета нормальной рефракции определяется качеством модели стандартной атмосферы и до зенитных расстояний не более 70 градусов составляет 0.″01 и выше. Большое значение здесь имеет выбор места наблюдений - высокогорье, с хорошим астроклиматом и регулярным рельефом местности, обеспечивающим отсутствие наклонных слоев воздуха. При дифференциальных измерениях с достаточным числом опорных звезд на ПЗС полосе можно учитывать влияние вариаций рефракции, таких как дневная и годичная.

Аномальная рефракция, такая как инструментальная и павильонная учитывается обычно достаточно хорошо с помощью систем сбора метеоданных. В приземном слое атмосферы (до 50 метров) используются такие методы как размещение метеодатчиков на мачтах и зондирование. Во всех указанных случаях можно достичь точности учета аномалий рефракции не хуже 0.″01. Труднее устранить влияние флуктуаций рефракции, обусловленных атмосферной турбуленцией высокой частоты, которые имеют доминирующее влияние. Спектр мощности дрожаний показывает, что их амплитуда значительна в диапазоне от 15Гц до 0.02Гц. Отсюда следует, что оптимальное время регистрации небесных объектов должно быть не менее 50 секунд. Эмпирические формулы, выведенные Э.Хегом ($\varepsilon = \pm\, 0.''33(T+0.65)^{-0.25}$, где T

- время регистрации) и И.Г.Колчинским ($\varepsilon = 1\sqrt{n}(\pm 0.''33(\sec Z)^{0.5}$, где n - число моментов регистрации) показывают, что при таком времени регистрации для зенитного расстояния (Z) равного нулю, точность положения (ε) звезды, около 0.″06-0.″10. По другим оценкам такой тип рефракции может быть учтен посредством измерений в течение одной-двух минут с точностью до 0."03 (А. Яценко), до 0."03-0."06 для звезд в диапазоне 9-16 величины (I. Reqiume) или до 0."05 (E. Hog). Расчеты, проведенные Стоуном и Даном показали, что с ПЗС МИ с полем зрения 30' x 30' и временем экспозиции 100 секунд можно измерить положения звезд дифференциально с точностью до 40 mas. Перспективная оценка, выполненная американскими астрономами Colavita, Zacharias и др. (см. табл.1.3) для широкоугольных наблюдений в видимом диапазоне длин волн показывает, что с помощью двухцветной методики можно достигнуть атмосферного предела точности, около 10 mas.

Табл.1.3.

Stone & Dahn	0."04 для звезд до to 14^m, FOV 30'x30', экспозиция 100 сек.
Requieme et al.	0."03 - 0."06 для звезд в диапазоне of 9^m -16^m , время наблюдений одна-две минуты
Colavita et al.	0."010 для двухцветной методики
Zacharias	0."010 метод коротких экспозиций

Для перспективных телескопов с полем зрения ПЗС, порядка, 60'x60', с использованием многоцветовой методики наблюдений, отражательной оптики, наконец с использованием дифференциальными методами опорных каталогов высокой плотности и точности типа ТС вполне реально достижение точности, порядка нескольких миллисекунд.

При современных технических возможностях автоматический меридианный телескоп АМТ, оснащенный ПЗС приемником, поле зрения которого может достигать одного квадратного градуса эффективно используется в качестве высокоточного инструмента в дифференциальной астрометрии. Из нескольких десятков широко использовавшихся ранее меридианных кругов в настоящее время известно семь наиболее совершенных, активно работающих автоматических меридианных телескопов (см. табл. 1.4). Их реальные программы включают сотни тысяч небесных объектов до 16-18 звездных величин, обеспечивая точность положений до 30-40 mas.

Табл.1.4. Действующие автоматические меридианные телескопы.

Инструмент	Место установки	Программа, число звезд	Яркость (mag)	Зона склонений (градусы)	Ошибка каталога (mas)	Состояние
PMC D190, F2576	NAOJ, Tokyo, $+36^0$	Input Catalog, 1.0 mln	12-16	-30 ÷ +45	30-50	1997-2001, серия из 7 каталогов

CAMC D178, F2665	La Palma, Canaries, $+29^0$, 2100 m	Опорные пл. Шмидта, 0.2 mln	7-17	-30 ÷ +90	30-50	Active, серия из 11 каталогов
FASTT D200, F2000	USNO, Flagstaff? $+35^0$, 2230 m	Изб. площ., тела с.с., 0.7 mln	17.5	-2 ÷ +2	40	1996-
MC D190, F2370	Bordeaux, Франция, $+44^0$, 75 m	Meridian-2000, изб. площ.	9-16	+11 ÷ +18	30-50	1997-2001
SFAMC D176, F2664	El Leoncito, Аргентинаб -32^0, 2330 m	Изб. площ, тела с.с.	7-15	-90 ÷ +30	50	1997-
Valinhos MC D190, F2576	San Paulo, Бразилия, -23^0	Изб. площ., тела с.с., радиозвезды	9-15	-77 ÷ +30	50	1996-
AMC D180, F2480	Николаев, Украина $+47^0$, 52 m	200 избр. ERS полей, изб. площ., тела с.с.	8-14 9-16	-10 ÷ +70 -20 ÷ +90	50 20-30	1996-1998 2001-

Г Л А В А 2

ВОЗМОЖНОСТИ МЕРИДИАННЫХ ТЕЛЕСКОПОВ С АВТОМАТИЧЕСКИМ УПРАВЛЕНИЕМ

2.1. Требования к современному меридианному телескопу.

Возросшие требования к точности определения координат небесных объектов, необходимость наблюдения все более слабых объектов, сжатые сроки обработки материалов наблюдений и обширные списки звезд, наконец конкуренция со стороны новых методов (РСДБ, космическая астрометрия) заставляют по-новому рассмотреть возможности наземных меридианных телескопов. Исходя из поставленных задач современной оптической астрометрии сформулируем требования к меридианному телескопу, способному реализовать с Земли максимально достижимую точность определения координат небесных объектов.

Прежде всего меридианный телескоп предназначается для определения обеих координат (прямых восхождений и склонений) небесных объектов - звезд, больших и малых планет, звездообразных и дискообразных объектов. Поскольку необходимо проведение массовых наблюдений сотен тысяч и миллионов звезд в относительно короткие сроки, то это возможно лишь при полной автоматизации всего процесса наблюдений и обработки полученных данных. Отсюда вытекает очевидное условие одновременного определения прямых восхождений и склонений небесных объектов, то есть инструмент должен быть универсальным, а именно, меридианным телескопом (кругом).

Телескоп должен быть автоматическим, т.е. иметь программное управление измерительными устройствами с необходимым набором контрольных и регистрирующих приборов. Программное управление должно обеспечивать работу телескопа по различным алгоритмам, в зависимости от поставленных задач: измерение положение небесных объектов в плоскости меридиана, измерения параметров инструмента, проведение исследований отдельных узлов МТ. Должна быть предусмотрена возможность подготовки исходных данных для наблюдений, срочной предварительной обработки и хранения полученной информации. Наконец, современные технологии и средства связи позволяют использовать управление телескопом на значительном удалении от астронома-наблюдателя, используя глобальные информационные сети, типа INTERNET в режиме удаленного доступа. Такая возможность работы автоматического МТ в глобальной информационной сети и участия удаленного пользователя как путем прямого сопровождения наблюдений по интересующей его программе, так и путем обмена информацией при подготовке программы, обработке и анализе результатов наблюдений должна быть предусмотрена.

Дополнительно, меридианный телескоп должен обеспечивать возможность фотометрирования наблюдаемых объектов в определенных участках спектра, связанных со стандартной фотометрической системой (например, системой Джонсона), возможность исследования рефракционных свойств атмосферы - для чего сбор и учет метеоданных должен быть

автоматизирован; отсчет метеопараметров должен осуществляться во время наблюдения каждого объекта.

После краткого обзора необходимых свойств меридианного телескопа можно сформулировать также его некоторые количественные показатели:

1) Внутренняя точность регистрирующих устройств МТ должна обеспечивать определение параметров системы телескопа и регистрацию небесных объектов и автоколлимационных марок по обеим координатам с точностью не хуже 0.”001 в угловой мере. В линейной мере, это требование соответствует величине около 0.01 мкм при фокусных расстояниях МТ 2-3 метра. С учетом возможностей современного приборостроения в области линейных и угловых измерений это вполне реальные условия. Указанные величины обеспечивают высокий точностной уровень исследования телескопа и учета его систематических ошибок, а также рефракционных аномалий. В конечном итоге, это условие определяет возможность получения координат небесных объектов посредством МТ с ошибками не более 0″.001;
2) Быстродействие меридианного телескопа - один из факторов, определяющих эффективность его работы. Для выполнения массовых наблюдений с одной стороны необходимо сокращать время регистрации небесных объектов. С другой стороны, атмосферные условия наблюдений (главным образом, дрожание), яркость наблюдаемых объектов, технические возможности телескопа определяют оптимальное время регистрации для достижения наивысшей точности. Учитывая спектр мощности дрожания изображений при средних условиях наблюдений для МТ с диаметром объектива 20 см, на зенитном расстоянии близком к нулю можно получить значение точности регистрации при времени наблюдений, порядка, 60 сек. (см.п.1.4). При этом ошибка регистрации увеличивается при удалении от зенита по закону $(\sec Z)^{0.5}$. Таким образом, атмосферные флуктуации с периодом колебаний до одной минуты будут учтены. Учитывая возможности ПЗС матрицы регистрировать одновременно все объекты в поле зрения, можно определить быстродействие автоматического МТ при указанных выше условиях величиной, не менее 7-9 тысяч звезд в час, при размере матрицы около 1000x1000 пикселей;
3) Предельная звездная величина МТ с ПЗС приемником в белом свете должна быть 16^m-18^m (V). Последняя величина определяется также необходимостью определения оптических аналогов внегалактических радиоисточников, и следовательно, прямой связью системы координат полученного посредством меридианного телескопа каталога небесных объектов с первичной фундаментальной системой;
4) поскольку современный ПЗС окулярный микрометр является по существу и фотометром, способным работать с различными светофильтрами, то представляется возможность определения для большого числа звезд попутно с получением координат еще и спктрофотометрических характеристик в принятых полосах (например B, V, R) с приемлемой точностью, не хуже 0.02^m. Помимо астрофизического интереса, возможно исследование характеристик

атмосферы в районе установки МТ, учет которых в конечном итоге ведет к повышению точности определяемых координат звезд;

5) поскольку автоматический меридианный телескоп может быть использован для работы в различных климатических зонах - экватор, высокие широты, высокогорье до 4000м над уровнем моря, при рабочих режимах температуры $\pm 30^{o}$, то необходимо предусмотреть возможность проведения длительных наблюдений, до 24 часов и более.

Завершая краткий перечень требований, предъявляемых к современному меридианному телескопу следует отметить, что являясь измерительным устройством, предназначенным для наземных угловых измерений координат небесных объектов, он должен рассматриваться как своего рода *рабочая эталонная установка* (или комплекс) наземной астрометрии. Тем более, что наблюдается тенденция сокращения числа меридианных телескопов и создания их в ограниченном количестве, но с широкими возможностями. В случае такого подхода к меридианному инструменту при его хранении и использовании должны учитываться рекомендации метрологического характера - регулярное проведение поверок (сличение, калибровка, градуировка и пр.) для оценки погрешностей мер и измерительных приборов всего комплекса, обеспечение высшей точности и максимально возможного постоянства их метрологических характеристик.

2.2. Обзор современных МТ классической системы.

Конечно, реальный меридианный телескоп не в полной мере удовлетворяет всем перечисленным в п.2.1 требованиям. Приведем краткое описание наиболее совершенных действующих МТ из 4-х групп различных оптико-механическими конструкций и регистрирующих устройств (табл.1.1 и 2.1).

Наиболее известным и распространенным еще со времен Ремера и Струве является астрометрический телескоп-рефрактор классической системы, используемый обычно в виде пассажного инструмента, вертикального или меридианного круга. Астрометристы давно работают на таких телескопах и достаточно хорошо знают их положительные и отрицательные стороны. Проведенная автоматизация некоторых МТ классического типа позволяет полнее использовать их возможности, хотя и ограниченные механическими и термическими деформациями, нестабильностью параметров и пр. В табл.2.1 показаны конструктивные и технические параметры трех автоматических меридианных телескопов однотипной классической конструкции - японский PMC, датский CAMC, американский FASTT.

2.2.1. Вначале рассмотрим автоматический МТ FASTT (Flagstaff Automatic Scanning Transit Telescope) Морской обсерватории США (USNO), как наиболее технически совершенный и имеющий самую обширную программу наблюдений. В дополнение к данным табл.2.1 отметим наиболее важные особенности FASTT.

Телескоп в высшей степени автоматизирован. Система программного управления (СПУ) включает компьютер DEC micro-VAX II для управления всеми операциями телескопа и записи данных устройств, регистрирующих

каждые 20 секунд поведение параметров телескопа и окружающей среды. Регистрируются данные об изменении азимута телескопа с помощью лазерных интерферометров с точностью ±0.05 микрона, т.е. ±0.″008; отсчеты круга, выполненные посредством CCD-TV камер и показания точного времени с помощью двух цезиевых часов. Система сбора метеоданных включает датчики температуры (±0.º05C), давления (±0.01мм Hg), влажности, скорости и направления ветра. Данные метеосистемы позволяют вычислять аномалии рефракции для каждого момента наблюдений. Температурные датчики контролируют также вертикальные градиенты температуры внутри трубы телескопа при вентилировании внутреннего объема посредством трех вентиляторов; таким образом удается снизить градиенты до величины не более ±0.º01C и уменьшить влияние рефракции. Для обеспечения наблюдений с ПЗС матрицей используется отдельный компьютер Silicon Graphics 4D/340S. Будучи расположенным на станции Флагстафф (Аризона), FASTT работает в режиме удаленного доступа в локальной сети с 1.55 метровым рефлектором, установленным на той же станции. По итогам каждой ночи полученные наблюдения обрабатываются до этапа дифференциальных экваториальных координат и звездных величин с помощью рабочей станции DEC 5000/200 Workstation, в течение, не более двух часов при минимальном участии астронома.

Итоги исследования FASTT:

1) проведены исследования всех 3′ делений лимба по методу датского астронома Хега (E.Hog);
2) исследовано поведение температурных полей в трубе телескопа, павильоне, показано температурное равновесие внутри вечеров наблюдений, что позволяет контролировать положение оси вращение FASTT;
3) посредством лазерных дальномеров и метеорологических датчиков каждые 20 секунд производится контроль положения телескопа относительно удаленной миры и учет павильонной рефракции.
4) ошибка единичного определения положения звезд ПЗС матрицей FASTT (1024×1024) по двум координатам обеспечивает внутреннюю точность до 15^{m} , порядка 0.″04 (см. рис.2.1). В 1996 году на инструменте была установлена ПЗС матрица большего размера (2048×2048). Точность регистрации звезд предельной величины 17^{m} ограничивается величиной 0.″2, обусловленной Пуассоновским шумом.

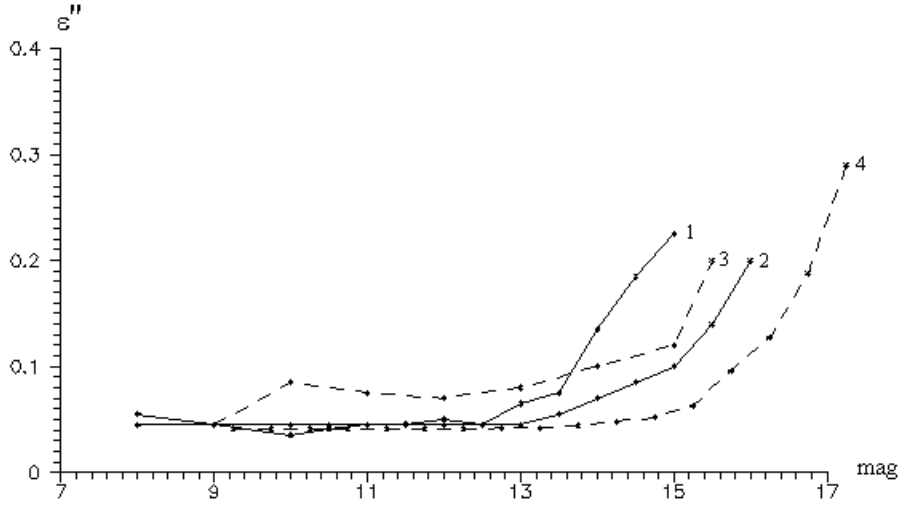

Рис.2.1.
Точность определения положений звезд в системе координат
ПЗС - матрицы
1 - АМК (ФППЗ-13М), 2 - АМК (ISD 017), 3 - РМС (Токио), 4 - FASTT (USA)



Рис.2.1. Общий вид AMT FASTT.

Точность FASTT в систематическом отношении показана на рис.5.5 и 5.6 (глава 5), где приведено сравнение средних систематических разностей вида $(O-C)_\delta$ и $(O-C)_\alpha Cos\delta$ в смысле (каталог - HC) для разных автоматических меридианных телескопов.

Программа наблюдений:

1. Непосредственные наблюдения 78 внегалактических радиоисточников для определения связи между оптической и радио системами координат с точностью ±3mas.
2. Определения положений звезд непосредственно в системе координат ICRF с целью поддержки и уплотнения каталога HC.
3. Наблюдения астероидов Гаспра и Ида с целью уточнения их положения в рамках программы Галилей в 1999 г.
4. Создание 16 избранных площадок с опорными звездами, размером $7.^0 6 \times 3.^0 2$ по экватору для обеспечения программы SLOAN Digital Sky Survey (SDSS) возможностью калибровки инструментальных параметров. Общее количество звезд 1.27 миллиона, яркостью от 10 до 18 звездных величин.
5. Наблюдения внешних планет - Уран, Нептун, Плутон и 17 спутников, принадлежащих внешним планетам от Юпитера до Нептуна.
6. Наблюдения астероидов и комет общим числом до 2100 по программе астероидной опасности. Планируется выполнять каждый год до 35000 наблюдений этих объектов.

Табл.2.1. Сравнительные характеристики избранных автоматических меридианных телескопов классической и горизонтальной конструкций

Характеристики	**АМК (Украина)**	**РМС (Япония)**	**САМС (Канары)**	**FASTT (США)**
I. Конструкция	аксиальный сидеростат в 1верт.	рефрактор в меридиане	рефрактор в меридиане	рефрактор в меридиане
- телескоп	D180мм, F2480мм	D190мм,F2576мм	D178мм, F2665мм	D=200, F=2000
оптический узел	ситаловый цилиндр	нет	нет	нет
- коллиматор в 1 вертикале	1 (D=180,F=12360)	нет	нет	нет
- коллиматор в меридиане	1 (D=180, F=2000)	2(D=190,F=1800)	2 (D=178, F=1800)	1 (F=4300)
- мира	1 (D=200, F=60м)	2 (D=190, F=80м)	2 (D178, F=20,50, 80м)	1
- горизонт	в надире	в надире и зените	в надире	нет
- время изготовления	1980-1995(1998)	1975-1982(1995)	1953-1982(1997)	1981-1990 (1996)
- широта установки	+46°58’	+35°40’	+28°46’	+35°11’
II. Технические параметры				
- метод регистрации	ПЗС (1040x1160), 16 мкм.pix (23′×26′)	ПЗС(1242x1152), 22.5 мкм.pix (30′×30′)	ПЗС (2060x2048), 9 мкм.pix (25′×25′)	ПЗС(2048x2048), 15мкм.pix (51′×51′)
- точность отсчета круга	±0”.02	±0”.01	±0”.04	±0”.01
- точность установки по Z	±4″	±2″	±2″	±0.″6
- предельная вел. (mag)	(14)16,5^m	16^m	(14)17^m	17.5^m
- участок спектра, точность	B,V,R; 0.05 ^{m}	B,V,R; 0.05	U,B,V; 0,05	U,B,V; 0.03
- производительность	(2500) 7000 зв/час	(120) 7500 зв/час	(120) 7000 зв/час	>9000 зв/час
III. Характеристика				

поведения инструмента - весовые деформации (горизонтальное гнутие) 1) термические деформации коллимация, азимут нуль-пункт круга наклонность	0.″037 0.”026/1°C 0.”09/1°C 0.”1/1°C 0.”09/1°C ±0.”08(secZ)$^{0.4}$	0.″96 0.”05/1°C 0.”10/1°C 0.”16/1°C 0.”03/1°C ±0.”14(secZ)$^{0.6}$	1″÷1″.5 0.”1/1°C 0.”1/1°C 0.”15/1°C 0.”1/1°C ±0.”20(secZ)$^{0.6}$	≈1.″00 ≈0.”05/1°C 0.”09/1°C 0.”16/1°C ±0.”14
Точность единичного набл. $\varepsilon_\alpha \cos\delta$ ε_δ	±0.”08(secZ)$^{0.5}$ ±0.” 02÷±0.” 03	±0.”14secZ ±0.” 03	±0.”18(secZ)$^{0.9}$ ±0.” 03	±0.”17 ±0.” 04
Систематические разности вида (HC-Cat) $\Delta\alpha_\delta$ $\Delta\delta_\delta$	±0.” 02÷±0.” 03	±0.” 02	±0.” 06	±0.” 04

2.2.2. Рассмотрим также некоторые данные для автоматического МТ CAMC (Carlsberg Automatic Meridian Circle), установленного с 1984 года на о. Ла Пальма (Канарские о-ва, Испания) при совместном использовании астрономов из Британии, Дании и Испании (см. табл.2.1, рис.2.2 и 2.3).

В 1997 году CAMC был снабжен программным управлением с возможностью удаленного доступа к участию в наблюдениях астрономов-наблюдателей из трех стран на расстоянии нескольких тысяч километров, исключая их непосредственное присутствие на инструменте. В 1999 году на CAMC была установлена более совершенная ПЗС матрица CCD KODAK (2060x2048, 9x9mkm). Испытания показали новые возможности CAMC: предельная звездная величина около 17^m; внутренняя точность единичного наблюдения для звезд 12^m около $\pm 0.″03$, звезды до 16^m регистрируются с точностью, около $\pm 0.″10$ по обеим координатам; быстродействие системы программного управления (СПУ) CAMC до 100-200 тысяч звезд за ночь.

Итоги исследования CAMC:

1) проведены исследования всех 5′ делений лимба в автоматическом режиме за 72 часа; до введения СПУ работа подобного типа могла быть выполнена за месяцы, если не годы;
2) исследовано поведение температурных полей в павильоне, в трубе телескопа для контроля положения оси вращения CAMC;
3) посредством метеорологических датчиков во время наблюдений производится регулярный контроль положения телескопа относительно удаленной миры и учет павильонной рефракции (каждые 5 минут, днем и ночью).

Точность CAMC в систематическом отношении достаточна высока и показана на рис.1.1 и 1.2 (глава 1), а также рис.5.5 и 5.6 (глава 5), где приведено сравнение средних систематических разностей вида $(O\text{-}C)_\delta$ и $(O\text{-}C)_\alpha \mathrm{Cos}\delta$ в смысле (каталог - FK5) и (каталог - HC) для разных автоматических меридианных телескопов.

Программа наблюдений:

1. Определения положений звезд в зоне склонений от -40^0 до $+ 90^0$ с целью создания входного каталога для космического проекта HIPPARCOS. Наблюдения 100 000 звезд до $15.^m4$ выполнялись в периоде, начиная с 1984г. по 1998 год (каталоги САМС N1-N11). На их основе был создан каталог INCA, использованный при создании первого космического каталога HC. В 1999 году был выпущен на CD-ROM диске сводный каталог всех наблюденных на САМС объектов, содержащий положения (ошибка единичного положения $\varepsilon = \pm 0.''06$) и собственные движения ($\varepsilon = \pm 0.''003$/y) 180 000 звезд в системе ICRF, также положения 184 малых планет солнечной системы.
2. Положения 18000 звезд яркостью до 13^m в площадках вокруг 230 внегалактических радиоисточников для определения связи между оптической и радио системами координат.

Эти пункты программы уже выполнены и в настоящее время начаты новые, которые обусловлены задачами современной астрометрии:
1. Определения точных положений звезд с целью поддержки и расширения каталога HC на слабые звезды (до 16^m и слабее).
2. Непосредственные наблюдения внегалактических радиоисточников и опорных звезд вокруг них для определения связи между оптической и радио системами координат.
3. Определения точных положений и фотометрии опорных звезд в избранных площадках Шмидта (50 стандартных площадок) для обеспечения программ цифровых обзоров неба, типа SDSS.
4. Продолжение наблюдений больших и малых планет солнечной системы.



Рис.2.2. Общий вид АМТ САМС.



Рис.2.3. Расположение павильона CAMC (о.Ла Пальма).

Г Л А В А 3

МЕРИДИАННЫЙ ТЕЛЕСКОП ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВОЙ СИСТЕМЫ

3.1. Описание Фотографического вертикального круга М.С. Зверева (Пулковская обсерватория).

Более поздним является зеркально-линзовый меридианный телескоп. По своей конструкции такой инструмент близок к классическому, поскольку имеет подвижную часть: горизонтальную ось с кругами и трубу с окулярным микрометром. Отличие в том, что труба зеркально-линзового телескопа в несколько раз короче трубы рефрактора и, следовательно, может быть улучшена жесткость тубуса и уменьшены весовые нагрузки. Конструкция зеркально-линзового телескопа обладает симметрией и компактна. Все это позволяет надеяться на уменьшение величины гнутия. Возможна также перекладка телескопа в лагерах.

В настоящее время в рабочем состоянии находится фотографический вертикальный круг (ФВК) Пулковской обсерватории. Фотографический вертикальный круг создан в 1962 году в Пулковской обсерватории под руководством известного астрометриста М.С.Зверева при активном участии автора оптической системы, примененной на ФВК Д.Д. Максутова и механика Д.С. Усанова. Современный общий вид ФВК показан на рис.3.1. Изменения конструкции ФВК по сравнению с классическим вертикальным кругом введены с целью уменьшить инструментальные ошибки инструмента. Основные особенности конструкции ФВК: для уменьшения разности температур противоположных частей инструмента, уменьшения гнутия трубы и исключения других источников ошибок были приложены все усилия для уменьшения размеров трубы и всего инструмента, применена зеркально-линзовая оптическая система - менисковый кассегрен Д.Д. Максутова, позволившая при “классических” диаметре и фокусном расстоянии телескопа, 20 см и 200 см соответственно, укоротить трубу до 60 см. При этом отпала нужда в высоком столбе, несущем весь инструмент, и, поставленный на платформу на большом подшипнике, ФВК обрёл, кроме того, полную симметрию: две стойки, несущие горизонтальную ось, два круга, два уровня. Кроме того, такая конструкция позволяет проводить перекладку за несколько секунд путем вращения платформы вокруг вертикальной оси. На рис.3.2 показана оптическая схема ФВК, включающая трубу (1) телескопа с двумя зеркалами - главное (2) и отшлифованное на обратной стороне мениска (3). Труба телескопа расположена центрально на горизонтальной оси, лежащей в лагерах алидадной стойки (рис.3.1). С трубой жестко связаны два разделенных стеклянных круга (4). На каждой стойке для лагеров, против торца оси, укреплены отсчетные микроскопы (5) кругов. Контроль положения телескопа можно производить с помощью двух горизонтально расположенных в меридиане коллиматоров (6). Для согласования направления осей коллиматоров в боковой стенке трубы ФВК имеются два отверстия. Коллиматоры позволяют контролировать коллимацию телескопа и определять горизонтальное гнутие.

Для определения склонений ФВК с перекладкой используются отсчеты высокоточных алидадных уровней и разделенных лимбов в двух положениях инструмента. При отсутствии перекладки процесс наблюдений на ФВК в принципе ничем не отличается от наблюдений на меридианном круге. В обоих случаях окулярный микрометр (7) на рис.3.2 должен обеспечивать измерение положений наблюдаемого объекта по двум координатам.

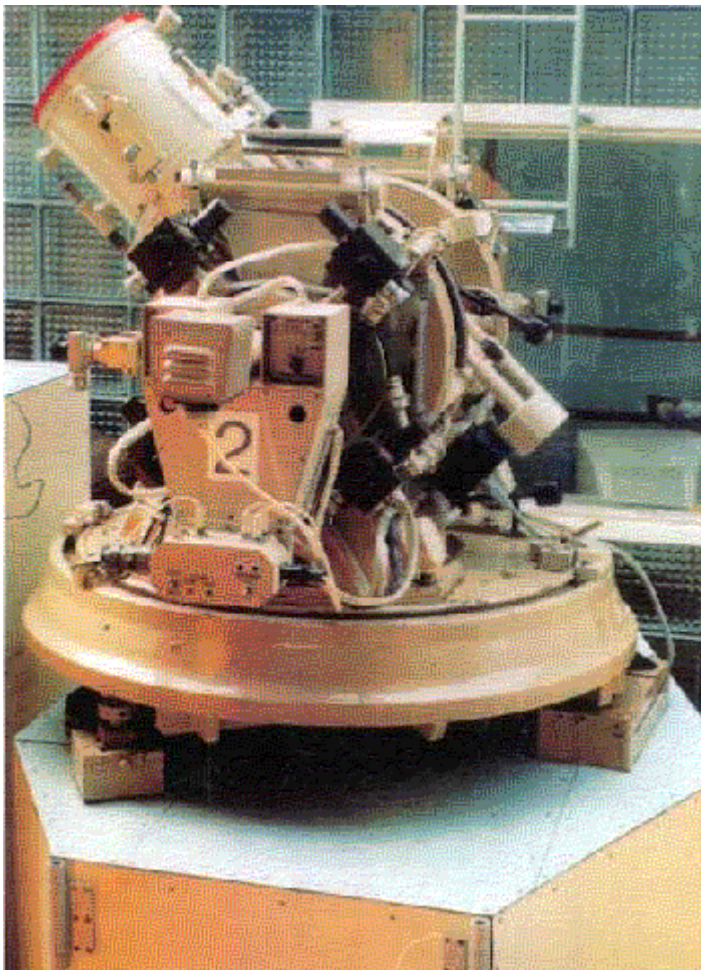

Рис.3.1. Общий вид ФВК.

После своего создания ФВК был доставлен в Чили и в 1963-1967 годах на нём наблюдались южные фундаментальные звёзды и проводились исследования. Был выполнен ряд принципиальных усовершенствований ФВК, позволивших ему получить каталог склонений южных звёзд. Позднее, уже в Пулкове к 1987 году ФВК был значительно модернизирован и улучшен, о чем показали исследования хроматической рефракции, гнутия, ошибок делений кругов. Среди усовершенствований ФВК надо отметить улучшение жёсткости платформы, вариант термической компенсации крепления оптики, новые оправы кругов, новые горизонтальные коллиматоры. Кроме того, была введена фотоэлектрическая система отсчёта кругов, а также визуально-фотоэлектрическая измерительная машина (ВФЭИМ). В разные годы в работах на ФВК принимал участие большой коллектив сотрудников Пулковской обсерватории, среди которых наиболее длительное время и вклад в решение

проблем ФВК сделали Б.К. Багильдинский, В.А. Наумов, В.Д. Шкутов и др. Обширные исследования по хроматической рефракции выполнены Е.Г. Жилинским, С.П. Пуляевым; работы по внедрению ПЗС на ФВК выполнялись под руководством Г.А. Гончарова.

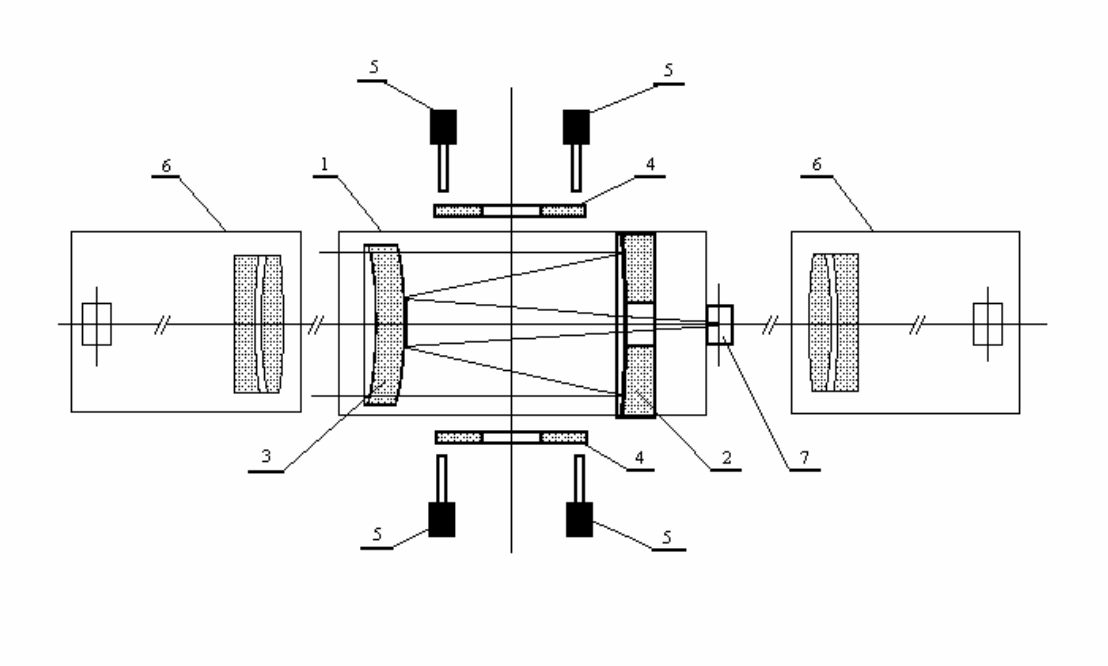

Рис.3.2. Оптическая схема пулковского ФВК.

В 1996 году ФВК был оснащен ПЗС регистрирующим окулярным устройством типа ST-6 (375x242 пикселей, 23x27мкм) фирмы SBIG (США). Размер поля зрения ПЗС матрицы соответствовал 14.8x11.2 угловых минут, режим работы - кадровый.

Введение в работу ПЗС микрометра позволило выполнять на ФВК наблюдения по двум координатам и с этого времени инструмент получил новое название - Пулковский меридианный телескоп. В настоящее время ПМТ установлен в павильоне полуцилиндрической формы, расположенном на научной площадке Пулковской обсерватории.

3.2. Основные технические данные ФВК (ПМТ):

Оптико-механическая система ФВК - менисковый кассегрен Д.Д. Максутова:

- диаметр объектива 200мм, фокусное расстояние 2000мм;
- масштаб поля зрения 103.25 сек/мм;
- поле зрения 45 угловых минут, исправленное - 35′;
- полоса пропускания 300-1000нм;
- монтировка вилочного типа с длиной трубы 0.6 метра на поворотной платформе для перекладки трубы на 180 градусов;

- 2 коллиматора в меридиане (диаметр объектива 180 мм, фокусное расстояние 2260мм);
- окулярный микрометр - CCD камера ST-6;
- фотоэлектрическая система отсчета двух лимбов - диаметр 412.5мм, стекло К8, 6′ деления, с точностью отсчета 0.″05 по одному микроскопу;
- установка по зенитному расстоянию с перекладкой инструмента (поворот на 180^0) в полуавтоматическом режиме;
- система управления обеспечивает полуавтоматический режим наблюдений.

4.3. Результаты исследования.

Исследования поведения инструментальных параметров ПМТ показали:

1) стабильность наклонности алидадной платформы в плоскости меридиана, а следовательно и наклонность горизонтальной оси определяется с точностью ± 0″.1;
2) стабильность нуль-пунктов разделенных кругов ФВК определена на уровне точности отсчета уровней - ошибка отсчета электронного маятникового уровня около ±0.″05;
3) исследование ошибок делений лимбов выполнено комбинацией метода розеток с постоянным углом между двумя разделенными кругами ФВК, задаваемым поворотом одного из кругов и метода непосредственного определения интервалов между штрихами по отсчетам базы делений. По результатам исследования оценена точность в случайном отношении всех делений лимбов ФВК на уровне ±0.″04; выявлены разности средних интервалов между минутными делениями, порядка 0.″83 ± 0.″04, что имеет своей причиной ошибки нанесения штрихов делительной машиной при изготовлении кругов; определены ошибки всех градусных делений лимбов на уровне ±0.″04; отмечено систематическое влияние ошибок круга на зенитное расстояние, близкое к функции Sin (2Z) с амплитудой порядка 1.″0, что по мнению авторов вызвано совместным влиянием эксцентриситета, ошибок поля отсчетных микроскопов и др. В целом, влияние ошибок делений круга при определении зенитных расстояний может быть учтено с точностью до ±0.″04;
4) исследование стабильности зеркально-линзовой оптической системы в поле силы тяжести и температуры является основным для телескопа ФВК, поскольку требования к положению зеркальных элементов значительно выше чем для преломляющей оптики классических инструментов. Изучение этого эффекта на ФВК оказалось сложным и длительным. В результате всестороннего изучения этого эффекта и проведенных измерений весовых деформаций методами горизонтальных коллиматоров и автоколлимационным выяснилось, что гнутие ФВК можно представить в общем виде функцией: F =

k(Z,t)SinZ, где k(Z,t) - коэффициент, зависящий от зенитного расстояния Z и температуры воздуха в трубе ФВК t. Комбинирование исследований автоколлимационным методом и методом горизонтальных коллиматоров Бесселя показало удовлетворительное согласие, включая реальные оценки влияния веса зеркала и изменение наклона торца трубы. Величина горизонтального гнутия по разным оценкам, разными авторами оценивалась величинами, порядка 2.″2 - 1.″8. Более точно влияние гнутия на наблюденное зенитное расстояние Z может быть представлено эмпирическим выражением в виде поправки:

$b = -\{1.''63 - 0.''00167[Z] + (0.''006 - 0.''0002[Z])\Delta t\}\,SinZ,$

где Z - в радианах, Δt - разность температуры воздуха в трубе.

В целом, исследования показали, что ошибка определения гнутия растет с зенитным расстоянием, при этом гнутие в горизонте определено методом Бесселя с точностью ±0.″07, а для $Z<60^0$ ошибка определения гнутия, а следовательно и учета его влияния не превосходит ±0.″05.

5) Исследование систематических разностей ФВК по склонению ($\Delta\delta_\delta$), в смысле "каталог ФВК - FK5" показало, что собственная система ФВК после исключения всех инструментальных и рефракционных ошибок, зависящих от зенитного расстояния определена с точностью, около ±0.″05 и достаточно стабильна при изменении температуры и времени. Система ФВК вида $\Delta\delta_\delta$ показала хорошее согласие с системами других каталогов северного неба и подтвердила наличие ошибок опорного каталога FK5. Это свидетельствует о достаточно полном учете инструментальных ошибок ФВК и о надежной привязке его системы к опорному каталогу FK5.

6) По итогам исследований с ПЗС камерой ST-6 получены следующие данные:

   - точность наблюдений оценивается среднеквадратической ошибкой одного наблюдения звезд 10^m -13^m при экспозиции 40 секунд около 0.″05 и достигает 0.″25 для звезд 15^m -16^m;
   - точность в систематическом отношении: по результатам ПЗС наблюдений систематические разности О-С для большинства звезд не превышают 0.″05 по обеим координатам при использовании опорного каталога ACT.

3.4. Итоги и программы наблюдений:

1. 1966 - 1972гг. В итоге наблюдений южного неба в экспедиции в Чили был получен "Абсолютный каталог склонений звезд южного неба";
2. 1974 - 1977гг. Наблюдения звезд FK4 до зенитных расстояний ±82 градусов в Пулкове;

3. 1977 - 1980гг. Получен каталог склонений для программы пулковских широтных звезд;
4. 1987 - 1995гг. Наблюдения Марса, Юпитера и звезд FK5. Получен абсолютный каталог PVC96 склонений 760 звезд из FK5 - точность каталожного положения оценена величиной;
5. 1997-1998 гг. Исследования ПМТ с ПЗС камерой ST-6, опытные наблюдения звезд до 16-й величины;
6. 1998 год и далее. Начало регулярных наблюдений программы северной близполюсной зоны (85-90 градусов) звезд до 16^m в системе HC/TC.

Г Л А В А 4

МК ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ В МЕРИДИАНЕ

Впервые предложение об использовании неподвижного горизонтального телескопа в меридиане с плоским зеркалом для астрометрических наблюдений было сделано английским астрономом Тернером в 1894 г. По идее Тернера, отраженный от зеркала луч света звезды мог быть направлен не только в одну, а даже в несколько труб, укрепленных на различных зенитных расстояниях.

В 1937 году пулковским астрономом Н.Н. Павловым было предложено использовать горизонтальный пассажный инструмент для определения прямых восхождений звезд. По его проекту предлагалось использовать одну трубу в меридиане, а для устранения виньетирования объектива трубы на больших зенитных расстояниях, предназначалось эллиптическое зеркало с соотношением осей до 2:1. Над реализацией идеи горизонтального вертикального круга для определения склонений звезд работали пулковские астрономы А.А. Илинич и Л.А.Сухарев. Предлагалось использовать две трубы в меридиане и вращающееся двустороннее зеркало между объективами труб.

В 1952-53 годах в Пулкове по идеям Л.А.Сухарева была построена модель горизонтального меридианного инструмента (ГМИ), на котором были проведены пробные наблюдения, а впоследствии Г.М.Тимашковой был получен каталог близполюсных звезд для исследования инструмента по прямому восхождению. Результаты обработки показали, что точность наблюдений на ГМИ не уступает точности наблюдений на классических меридианных инструментах.

В 1948 году Р. Аткинсон на заседании Королевского астрономического общества Англии выступил с показом модели ГМИ, особенности конструкции которого легли в основу создания ГМИ в Порто (Португалия) и Оттаве (Канада). ГМИ в Оттаве был создан в 1953 году. В силу особенностей конструкции оттавского ГМИ (кварцевое зеркало в металлической оправе) первые результаты наблюдений не дали ожидаемого увеличения точности определения координат, особенно, склонений звезд. Причиной этого, по всей вероятности, явилось смещение зеркала в оправе. К сожалению, впоследствии, инструмент не будучи исследованным до конца был демонтирован.

В 1957 году о постройке ГМИ в Порто сообщил португальский астроном Баррос. О результатах исследования системы этого ГМИ известно мало, но работы по его автоматизации велись еще в 1968г.; в материалах последних съездов МАС сообщения о работах на португальском ГМК отсутствуют.

В 1960 году на научной площадке Главной астрономической обсерватории АН СССР в Пулкове был установлен горизонтальный меридианный круг (ГМК), изготовленный киевским заводом “Арсенал” по идеям и предложениям Л.А.Сухарева. После доработки фотоэлектрического окулярного микрометра и других узлов, весной 1967г. было начато исследование системы прямых восхождений ГМК по наблюдениям звезд списка FK4. В 1972 г. Г.И. Пинигиным был получен каталог поправок прямых восхождений 188 звезд со склонениями от -10 до

$+86^0$. В итоге проведенных исследований было показано, что инструмент дает хорошие результаты как в отношении случайных, так и систематических ошибок. В последующие годы на пулковском ГМК при активном участии казанских астрономов Р.И. Гумерова, В.Б. Капкова и других были разработаны высокоточные регистрирующие устройства и создана система программного управления ГМК. В 1981-85 гг. на ГМК были проведены исследования склонений посредством автоколлимационных измерений и экспериментальных наблюдений звезд FK4. Были получены данные, что гнутие ГМК определяется прежде всего формой отражающей поверхности зеркала, а не его весовыми деформациями. Точность определения склонений на ГМК в систематическом отношении высока - по результатам наблюдений можно было говорить об уровне 0”.05. После освоения и исследования системы программного управления в 1988-90 гг. на ГМК выполнялись регулярные наблюдения ярких и слабых звезд по обеим координатам в режиме автоматического управления, с целью получения каталога положений слабой части FK5, а также дифференциального каталога положений опорных звезд, расположенных в площадках с радиоисточниками.

4.1. Описание Горизонтального меридианного круга Л.А.Сухарева (Пулковская обсерватория).

Пулковский горизонтальный меридианный круг в своем становлении претерпел изменения по крайней мере на протяжении трех периодов. Вначале следует выделить стадию идеи, на которой ГМК был задуман своим автором - Л.А.Сухаревым. Этот теоретический образ инструмента изложенный ранее по разным причинам не был реализован в полном объеме при создании ГМК в 1960 году. Хотя отдельные элементы схемы такого ГМК были исследованы и проверены Л.А.Сухаревым на модели - ГМИ в 1952-53 гг.

На второй стадии ГМК был приведен в рабочее состояние для наблюдений в полуавтоматическом режиме с целью исследования системы прямых восхождений инструмента (1967-72 гг.). По техническим причинам не работали боковые коллиматоры с эккерами, фотоэлектрический отсчет круга, миры. Хотя эти узлы были спроектированы и изготовлены, однако, обнаруженные в них недостатки оказались настолько серьезными, что, например, устройство отсчета круга пришлось впоследствии целиком заменить, а от использования боковых коллиматоров и мир полностью отказаться. При наблюдении прямых восхождений звезд использовался фотоэлектрический окулярный микрометр с неподвижной решеткой - анализатором. Третья стадия ГМК наступила после полного оснащения инструмента высокоточными регистрирующими устройствами (фотоэлектрический окулярный микрометр с активной решеткой-анализатором, устройства отсчета круга и наведения по зенитному расстоянию, программное управление). После исследования в 1981-85 гг. системы склонений и внедрения программного управления на ГМК выполнялись регулярные наблюдения звезд по обеим координатам и в автоматическом режиме (1988-90 гг.).

4.1.1 Схема, методические особенности.

Рассмотрим принципиальную схему пулковского ГМК (см. рис.4.1).

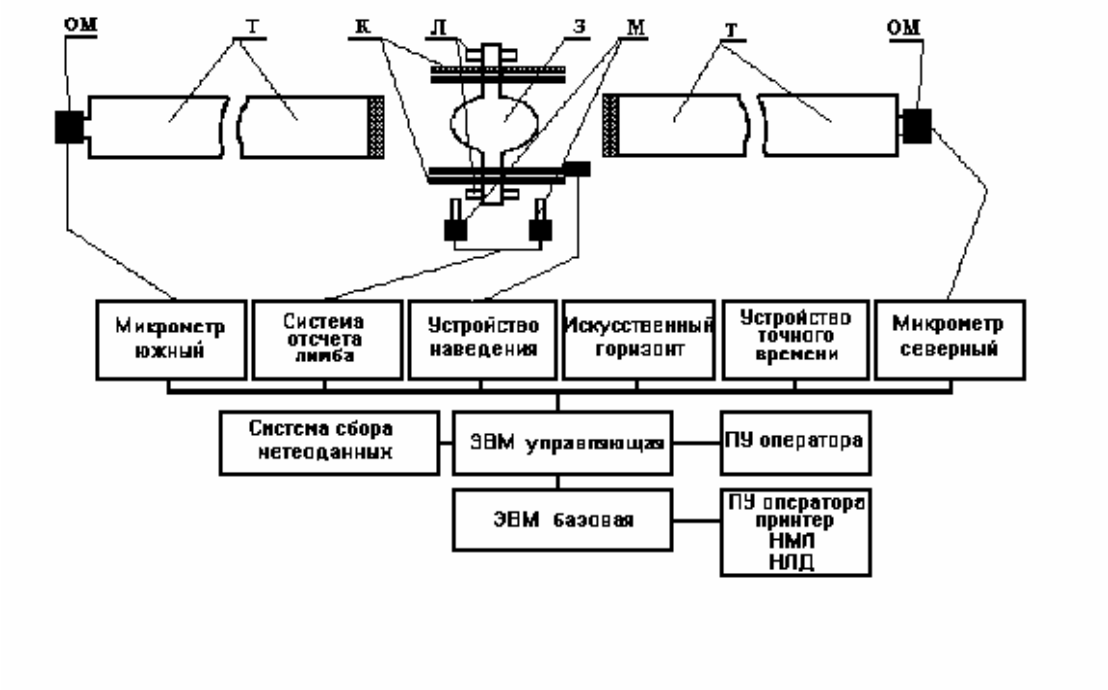

Рис.4.1 Принципиальная схема ГМК с программным управлением

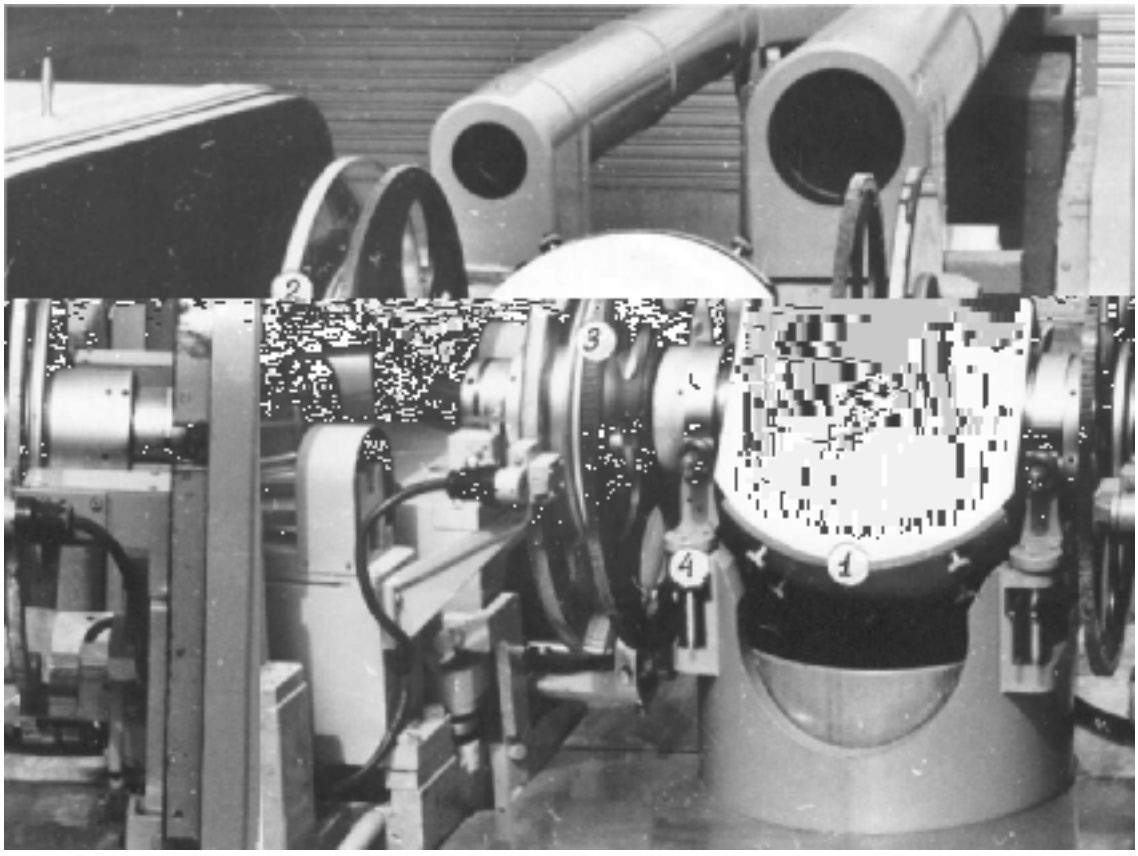

Рис.4.2. Вид центральной части пулковского ГМК.
(1 – зеркало, 2 – разделенный круг, 3 – шестерня, 4 – система разгрузки)

Л в плоскости первого вертикала. На оси с двух сторон зеркала расположены круги К. К северу и югу от зеркала в меридиане установлены на фундаментах две горизонтальные трубы Т. При наблюдениях звезд зеркало устанавливалось на определенный угол так, чтобы отраженное от зеркала изображение звезды попадало в северную или южную трубу для регистрации в окулярных микрометрах ОМ.

Определение наклона оси вращения зеркала, а также точки надира на разделенном круге предусмотрено производить посредством искусственного горизонта, устанавливаемого на фундаменте под зеркалом. Можно использовать горизонты разного типа (ртутный, масляный или маятниковый).

Рассмотрим более подробно преимущества приведенной схемы ГМК. Прежде всего в ней значительно ослаблено влияние механических и термических деформаций инструмента на точность наблюдений. Механические деформации (гнутие) сравнительно небольшого зеркала должны быть меньше деформаций трубы классического меридианного круга. Термические же изменения, как показали исследования последних лет, малы и могут быть определены с достаточной степенью точности. Гнутие труб практически исключено, поскольку трубы неподвижны, а в случае пулковского ГМК и не связаны с объективами и окулярными микрометрами. Устойчивость визирной оси трубы повышена за счет неизменного положения объектива и окулярного микрометра относительно направления силы тяжести, поскольку в этом случае отсутствуют всякого рода смещения с зенитным расстоянием, характерные для классических инструментов. Неизменное положение окулярной части позволяет с удобством использовать на ГМК современные методы регистрации прохождений звезд, не ставя при этом весовых и габаритных ограничений. Использование длиннофокусных труб должно приводить к меньшим угловым смещениям их визирных осей при одинаковых линейных перемещениях концов труб ГМК и горизонтальной оси классического меридианного инструмента.

Из недостатков схемы ГМК обычно отмечают удвоение влияния ошибок отсчета разделенного круга и погрешностей положения штрихов на определение склонений, увеличение зависимости определяемых прямых восхождений звезд от погрешностей цапф. Кроме того, на ГМК затруднены наблюдения звезд, расположенных не высоко над горизонтом, так как они могут экранироваться оправой объектива трубы. Возможны также рефракционные эффекты на длинном горизонтальном пути световых лучей от звезд в павильоне и трубе. Возможно, появление ошибок из-за различия условий наблюдений звезд на разных склонениях в каждую трубу (неполная засветка объективов труб при наблюдении звезд на больших зенитных расстояниях, искажения изображений звезд при больших углах наклона светового пучка к отражающей поверхности зеркала). Часть указанных недостатков (влияние ошибок отсчета круга рефракционных эффектов, погрешностей цапф) вполне устранима при использовании возможностей современного технического уровня. Влияние остальных эффектов на результаты наблюдений значительно ослабляется при тщательном исследовании системы ГМК и последующем ее учете.

4.1.2. Конструкция.

Общий вид пулковского ГМК показан на рис.4.2 и 4.3, принципиальная схема фундамента и павильона на рис.4.4.

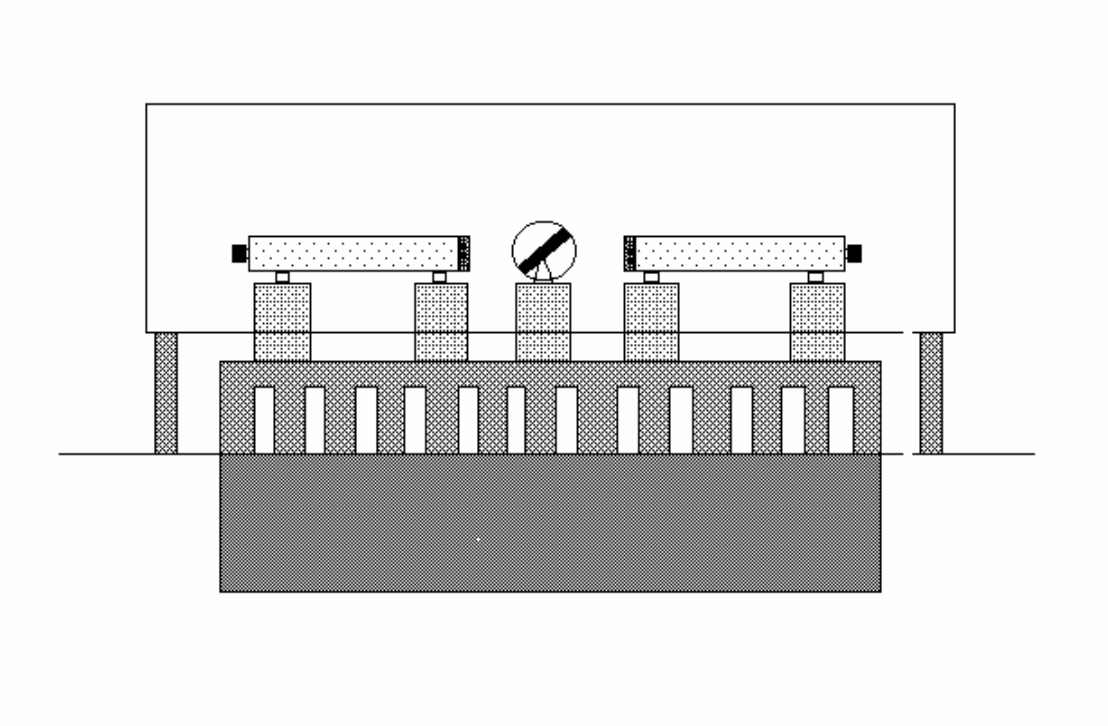

Рис.4.4. Схема открытого фундамента и павильона пулковского ГМК.

Двустороннее, металлическое, монолитное с осью зеркало З имеет толщину 90 мм, диаметр 300 мм, длину горизонтальной оси вращения 750 мм (см. рис.4.1 и 4.2). Ось вращения зеркала проходит через его центр тяжести и фиксируется лагерами в плоскости первого вертикала. С двух сторон на оси зеркала закреплены стеклянные разделенные круги К, служащие для отсчета углов поворота зеркала вокруг горизонтальной оси. Рядом с кругами закреплены также зубные шестерни устройства наведение зеркала по зенитному расстоянию (3 на рис.4.2). На концах оси зеркала закреплены торцевые зеркала. В системе разгрузки используется колонка, на верхнем конце которой вилка с разгрузочными рычагами и противовесами поддерживает ось зеркала снизу в двух местах. Изменения ориентировки зеркала производится микрометренными винтами лагерных барабанов, установленных на залитых в бетонные столбы закладных деталях. На барабанах, кроме лагер зеркала установлены фотоэлектрические микроскопы отсчетной системы разделенного круга. Осветители микроскопов размещены на отдельных кронштейнах, установленных на столбах. На одном из бетонных столбов расположены двигатели, редукторы и карданный вал с ведущей шестерней устройства наведения зеркала. К северу и югу от зеркала, в меридиане, на двух бетонных столбах расположены главные трубы ГМК, с фокусным расстоянием 4,2 м; диаметр объективов труб 190 мм. Посредством рядом расположенных коллиматоров и эккеров (см. рис.4.2) предполагалось осуществлять постоянный контроль за положением горизонтальной оси зеркала, а также определение ориентировки коллиматоров относительно мир, установленных вне павильона на удалении 27 м. Однако, эккерный узел показал при испытаниях значительную неустойчивость, поскольку по

координатной оси, параллельной его ребру он аналогичен зеркалу. По этой причине использование коллиматоров стало нецелесообразным. К тому же оказалось невозможным производить наведение коллиматоров на миры ГМК, поскольку из-за просчета строителей они были установлены вне меридиана коллиматора. Так как указанные узлы ГМК не были использованы, в дальнейшем описании инструмента они не участвуют.

Объективы главных труб состояли из стеклянных линз, помещенных в самоцентрирующие оправы "лагерного" типа, подобные лагерам меридианных инструментов. К лагерам линзы прижимались только своим весом. Лагеры были закреплены непосредственно на закладных деталях столбов. Такие же лагеры установлены на столбах окулярных концов труб и в каждой, аналогичным образом, установлен стеклянный диск, по сорту стекла и диаметру близкий к кроновой линзе объектива. В центре диска имелось отверстие, в которое вставлена и закреплена трубка фотоэлектрического окулярного микрометра с неподвижной решеткой-анализатором. Впоследствии, новый фотоэлектрический окулярный микрометр с активной решеткой-анализатором был установлен на отдельных закладных деталях, связанных с бетонным столбом окулярного конца горизонтальной трубы. Изменение закрепления окулярного микрометра было вызвано усложнение его механической конструкции. Корпуса труб не связаны с объективами, окулярами и со столбами, а лежат на стальных опорах, огибающих столбы, не касаясь их. Таким образом, деформации корпусов труб не оказывают влияния на положение визирных осей. В то же время трубы выполняют функции световодов, световой путь от рассеянного света и от турбулентных воздушных потоков. Корпуса труб сделаны двойными: внутренняя труба - стальная массивная, а внешняя - легкая, алюминиевая. В промежутке между стенками внешней и внутренней труб устроены хода из кабельной ленты в виде двухзаходной спирали и по ним может продуваться воздух. Определение наклона оси вращения зеркала, а также точки надира на разделенном круге ГМК предусмотрено производить посредством искусственного горизонта, устанавливаемого на фундаменте под зеркалом; можно использовать ртутный и маятниковый горизонты.

ГМК установлен в павильоне оригинальной конструкции (рис.4.4). Корпус павильона закрывает лишь верхнюю часть столбов. Основания столбов и верхняя часть фундамента находятся на открытом воздухе (обваловка отсутствует). По замыслу Л.А.Сухарева, это должно было способствовать более быстрому выравниванию температуры внутри столбов, уменьшению запаздывания температуры столбов по отношению к температуре окружающего воздуха, установлению более однородного температурного поля вокруг инструмента. Для это же фундамент прорезан сквозными щелями. Корпус павильона металлический, с внутренней деревянной обшивкой и теплоизоляционной прокладкой между стенками. Основание фундамента и павильон инструмента окружает конусообразный слой (уплотненная глина), сверху засыпанный культурной почвой. Благодаря наклону образующей конуса дождевые и талые воды, попадающие на него, отводятся к дренажным канавам по периферии конуса; радиус конуса, выполняющего роль своеобразного зонта, около десяти метров. Таким образом, должны быть уменьшены изменения положений столбов ГМК и возникают предпосылки для осуществления надежной связи ГМК с землей.

Управление ГМК производится из специальной кабины в павильоне, где установлены электронные блоки регистрирующих устройств инструмента, пульт управления оператора-наблюдателя, периферийные устройства регистрации, управляющий компьютер и процессор обработки. В кабине размещен также визуальный микроскоп для контроля наведения зеркала по зенитному расстоянию. Кабина теплоизолирована от павильона, для отвода тепла из кабины за пределы павильона имеется вытяжная вентиляция, которая работает во время наблюдений.

4.1.3. Система программного управления (СПУ) ГМК.

Фотоэлектрический отсчет лимбов (ФОЛ) - предназначен для определения высокоточных склонений звезд . С этой целью с двух сторон на оси зеркала закреплены два стеклянных лимба с диаметром разделенной окружности 412,5 мм, толщиной 16 мм. Штрихи шириной 10 мкм, длиной 1 мм, вытравлены на стекле К8 через 5 угловых минут (300 мкм). ФОЛ ГМК является устройством, состоящим из оптико-механической части и электронных блоков. Оптико-механическая часть ФОЛ содержит четыре основных фотоэлектрических микроскопа, расположенных под углом 45^0 к горизонту, и два дополнительных - для исследования ошибок деления лимба ГМК. Каждый микроскоп снабжен осветителем. Микроскопы крепятся за тубусы в специальных держателях на концах крестообразной рамы, которая в свою очередь связана с цилиндрическим барабаном. Массивные барабаны с двух сторон зеркала жестко закреплены на легерных опорах и закладных деталях восточного и западного столбов фундамента инструмента. Крепления отсчетных микроскопов обеспечивают необходимую регулировку их положения при выставлении на диаметрально противоположные штрихи лимба. Дополнительная пара микроскопов размещена на подвижном кронштейне. Микроскопы вместе с осветителями входят в состав центрального узла. Оптическая часть фотоэлектрических отсчетных микроскопов выполнена по схеме: осветитель - лимб - микроскоп. Осветитель содержит лампу, конденсор, линзу и призму. Отсчетный микроскоп состоит из тубуса с микрообъективом и корпуса. Анализирующим элементом является сканирующий узел, расположенный в корпусе. Он состоит из щелевой диафрагмы, измерительной решетки, закрепленных на оси. Положение сканирующего узла измеряется с помощью растрового датчика, который, кроме измерительной решетки содержит также неподвижную индикаторную решетку, фотоприемник и предусилитель. В растровом датчике используются решетки с шагом 20 мкм. Электронный интерполятор преобразует сигналы с растрового датчика в импульсы с ценой 0.2 мкм. Микрообъектив отсчетного микроскопа строит изображение сканирующего участка лимба в плоскости щелевой диафрагмы.

Отсчет одного микроскопа состоит из двух режимов: калибровки и измерения. Калибровка осуществляется в течении действия импульса тока Ic и нерабочего хода сканирующего узла до упора. В это время производится амплитудная дискриминация сигналов изменения контраста штрихов и решетки на уровне 0.5, а также компенсируются изменения контраста штрихов и решетки, нестабильность ламп осветителей и электронных схем фотоканала микроскопов. По окончании импульса тока Ic начинается

режим измерения. При этом сканирующий узел под действием силы тяжести двигается в исходное состояние и вырабатывает сигналы штрихов лимба Us и растрового датчика Ur. Из сигналов растрового датчика формируется последовательность импульсов, которые вместе с упором задают нуль-пункт микроскопа. На основе полученных последовательностей импульсов, сформированных из сигналов штрихов и нуль-пункта микроскопа организуется таким образом счет импульсов (один импульс соответствует, примерно, 0”.013), что в счетчике по завершению сканирования образуется два числа, соответствующие расстоянию между первым штрихом и нуль-пунктом и базы - расстоянию между двумя штрихами лимба. Эти два числа, полученные по каждому микроскопу последовательно, являются исходными для вычисления отсчета круга по всем микроскопам по известной методике.

Устройство автоматического наведения зеркала по зенитному расстоянию - состоит из оптико-механических узлов и блоков электроники. К оптико-механической части относится механизм поворота зеркала, в который входят двигатели грубого (реверсивный двигатель постоянного тока) и точного (шаговый двигатель) поворота, редукторы, электромагнитная муфта (релаг), карданный вал, две шестерни, одна из которых закреплена на оси зеркала, вторая входит в узел сцепления. Кроме этого, имеется фотоэлектрический установочный микроскоп с осветителем, который позволяет отсчитывать 5-минутные штрихи разделенного круга при вращении зеркала. Для точного измерения положения зеркала (до долей угловой секунды) используется фотоэлектрический отсчет лимба. Для визуального контроля положения зеркала используется блок цифровой индикации, показывающий содержание регистра текущей координаты и визуальный контрольный микроскоп ГМК, позволяющий отсчитывать положение лимба с точностью до ±5”. Работой всего устройства управляет программный контроллер.

По заранее рассчитанным установочным координатам на вечер наблюдений, полученным с учетом изменения видимых мест звезд, атмосферной рефракции и нуль-пунктов разделенных кругов управляющий процессор вычисляет величину поворота зеркала. С помощью двигателя грубой установки зеркало поворачивается на нужное число 5-минутных интервалов. Скорость вращения 10 град./сек. Для уменьшения проворота, вызываемого инерцией зеркала реализован специальный режим плавного торможения. Точной поворот зеркала внутри 5-минутного интервала осуществляется посредством шагового двигателя. Для устранения выкатывания зеркала из лагер и вследствие этого изменения азимута его горизонтальной оси установка зеркала на заданное зенитное расстояние заканчивается вращением точной ступени в одном, принятом направлении. Упругие деформации и люфты в механизме поворота зеркала учитываются специальным алгоритмом наведения.

Использование устройства установки зеркала ГМК при наблюдениях звезд показало точность наведения, около ±2″, время установки не превышало 15 секунд. Эти параметры соответствуют уровню, достигнутому на зарубежных автоматических меридианных кругах.

Окулярный фотоэлектрический микрометр - последняя до ПЗС приемников версия двухкоординатного автоматического звездного микрометра (ДАЗМ) со сканирующей решеткой-анализатором. В основу конструкции ДАЗМ положено линейное сканирование поля зрения ГМК решеткой-анализатором (6) с системой 26 щелей вида V-элементов (рис.4.5).

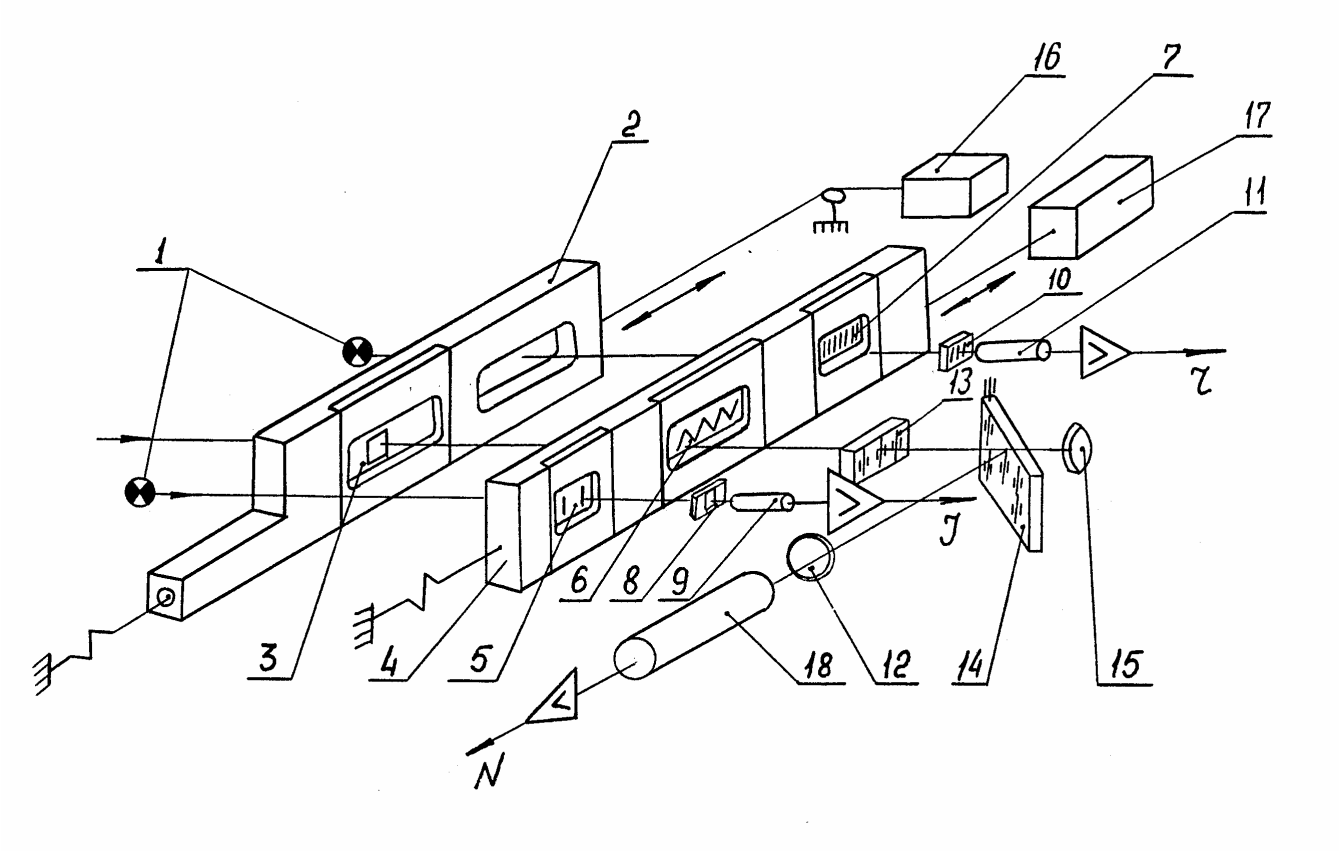

Рис.4.5. Оптико-механическая схема окулярного микрометра ДАЗМ.

Решетка зафиксирована в рамке сканирующего элемента (4), движение которого регистрируется растровым датчиком перемещений, включающего растровую решетку (10), с точностью до 0.2 мкм. Для ограничения фона неба перемещение изображения звезды в поле зрения сопровождалось диафрагмой (3). После регистрации фотоумножителем (18) моментов прохождения звезды по щелям решетки-анализатора строится координатно-временная шкала регистрограммы, где учтены вариации скорости движения сканирующего узла. Окончательно, регистрограмма осредняется по всем щелям решетки-анализатора и обрабатывается методом медианы для получения координаты звезды X в системе ДАЗМ. Зная совокупность положений звезды X и моментов времени прохождения звезды через центр каждой щели T можно получить по существу траекторию движения изображения звезды в фокальной плоскости и, следовательно, вычислить момент прохождения звезды через меридиан ГМК ($T_{пр}$), необходимый для определения прямого восхождения:

$$T_{пр} = \frac{1}{n}\sum_{i}^{n}\left\{\left(\frac{T_л + T_п}{2}\right)_i \pm \left[\left(\frac{X_л + X_п}{2}\right)_i + (n-i)Д\right]\frac{R_x}{V_{зв}}\right\} \quad (4.1)$$

где i - номер V-элемента решетки, n – количество наблюденных элементов решетки, Д – расстояние между V-элементами решетки, $V_{зв} = 15\cos\delta["/сек]$, п, л – правые и левые щели отдельного элемента решетки, R_x - масштаб в плоскости измерений по оси OX, u – поправка часов, ΔT - учет параметров ориентировки ГМК, ρ - суточная аберрация. Выбор знака определяется кульминацией звезды и направлением сканирования.

Определяя расстояние траектории движения изображения звезды от горизонтальной плоскости в точках измерений (отсчет ДАЗМ-m) получим данные для определения зенитного расстояния и далее склонения:

$$Z = (2M_л - m + r) - (2M_0 + i') - 90^0 \text{ (для N трубы)},$$

$$m = \frac{R_y}{2n}\sum_i^n \left[(X_п - X_л)_i \pm \frac{15''}{R_x}(T_п - T_л)\cos\delta \right] tg\gamma \qquad (4.2)$$

где $M_л$ – отсчет круга по 4-м микроскопам с учетом ошибок делений, M_0 - нульпункт круга, i' - наклон трубы, ρ - поправка за рефракцию, R_y - масштаб в плоскости измерений по оси OY, δ - склонение наблюдаемой звезды, γ - угол наклона щелей решетки к оси OX ($\approx 45^0$). Выбор знака также определяется кульминацией звезды.

Являясь основным элементом программного управления ГМК ДАЗМ показал высокую внутреннюю точность, порядка ±0.″05 на единичной щели, а разработанные методы учета параметров ДАЗМ (геометрия и ориентация решетки-анализатора, масштабные коэффициенты, нульпункты и др.) позволяют достаточно полно исправлять наблюденные данные для получения точных координат звезд. Предельная регистрируемая звездная величина - 11^m, время регистрации одной звезды от 20 до 60 секунд.

Маятниковый зеркальный горизонт (МЗГ) - прибор, предназначенный для определения наклонности зеркала и труб, места надира (нульпункт) разделенного круга ГМК. МЗГ создан в Пулковской обсерватории Л.А. Сухаревым на основе гравитационного маятника (рис.4.6).

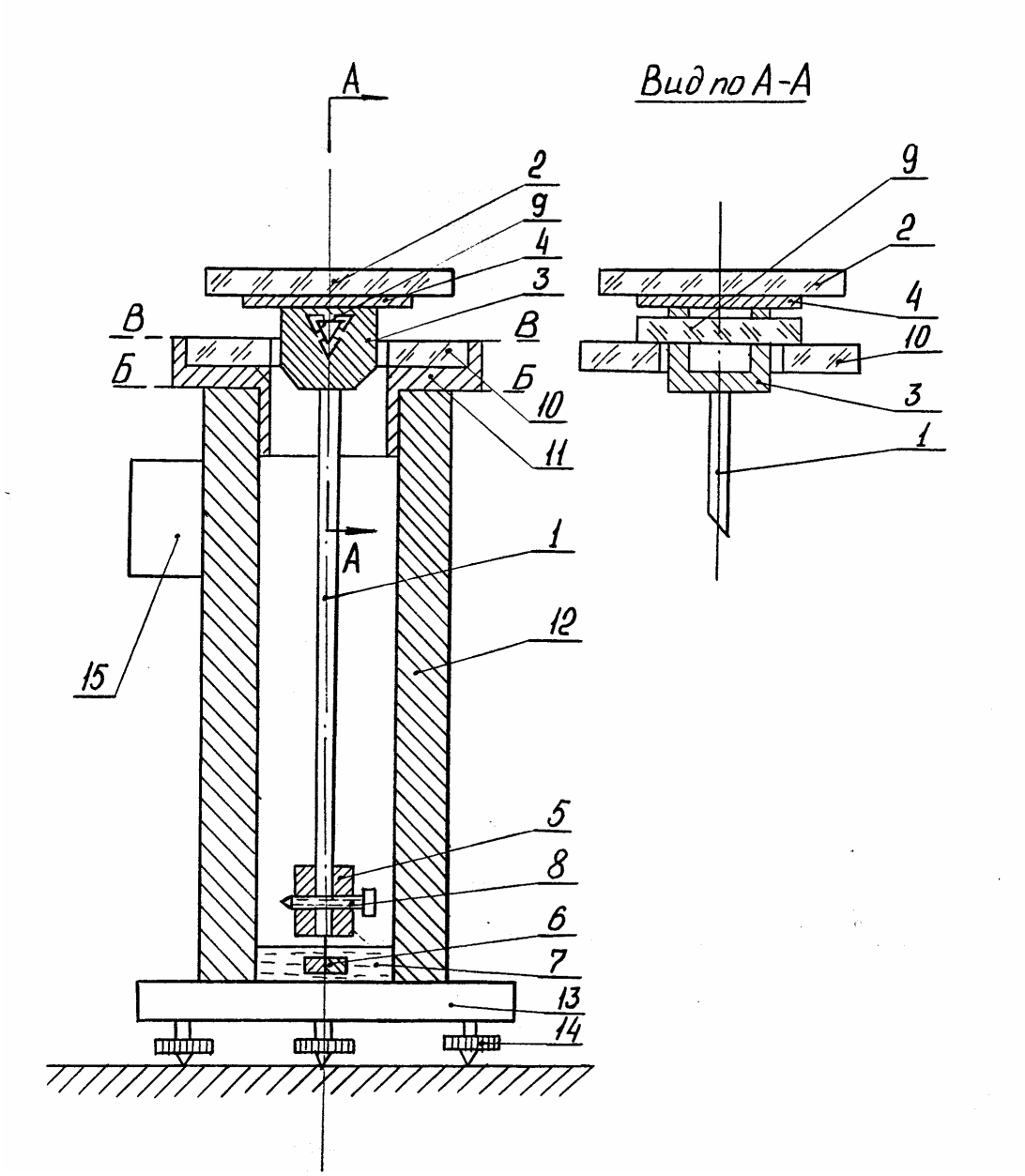

Рис.4.6. Принципиальная схема МЗГ ГМК. (1 – стержень маятника, 2 – зеркало, 3 – переходная втулка, 4 – пластина, 5 – груз, 6 – крестовина, 7 – демпферная жидкость, 8 – балансировочный винт, 9 – агатовая призма, 10 – агатовая опорная плата, 11 – оправа шестерни, 12 – корпус, 13 – основание, 14 – подъемные винты, 15 – устройство перекладки).

Схема МЗГ включает маятник с плоским зеркалом, диаметром 90 мм. Подвес маятника с зеркалом осуществлен агатовой призмой, которая ребром свободно лежит на плоской агатовой плате, способной вращаться вокруг вертикальной оси и фиксироваться через 90 градусов. Время демпфирования колебаний маятника, длиной 58 сантиметров в масляной ванне около 2-х минут, средний период качания маятника 0.6 секунд. В условиях регулярных наблюдений с МЗГ стабильность основного параметра МЗГ – коллимации, сохранялась устойчивой с точностью ±0.03” в течение 35-40 минут. Реальное время измерений с помощью МЗГ в четырех положениях маятника около 8

минут. В целом, МЗГ позволяет фиксировать направление отвесной линии и определение необходимых параметров ГМК с точностью ±0.”04 ÷±0.”06.

Система программного управления ГМК - после автоматизации всех основных операций при определении координат наблюдаемых объектов ГМК была создана система программного управления (СПУ) всеми измерительными устройствами. СПУ предназначено для реализации автоматического режима работы рассмотренных выше регистрирующих устройств в реальном масштабе времени, обработки поступающих от измерительных устройств данных, редукционных вычислений, хранения и документирования результатов наблюдений.

Программные средства ГМК, в целом, состоят из программного обеспечения управляющего компьютера и ПО компьютера данных (рис.4.7). К первому относятся целевые программы обслуживания аппаратных средств, монитор и драйвер. Монитор УК обеспечивает организацию решения задач в реальном времени, управление устройствами ввода/вывода, организацию многозадачного режима работы целевых программ, что позволяет совмещать во времени управление аппаратными средствами.

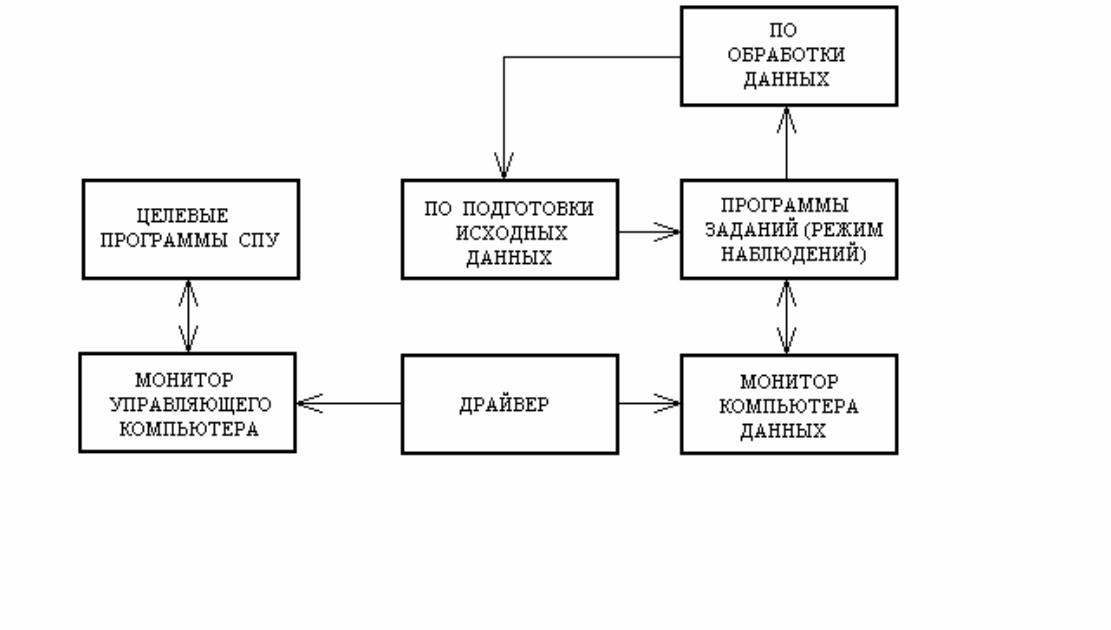

Рис.4.7. Программные средства ГМК.

В состав монитора УК входят также программа “Часы”, программа вывода данных в аналоговом режиме, подпрограммы работы с массивами (пересылка, вычисление контрольной суммы, сравнение массивов). Список целевых программ содержит программы управления наведением на звезду, управления отсчетом лимба, фотоэлектрическими окулярными микрометрами, маятниковым зеркальным горизонтом. Для организации обмена данными и конструкциями между УК и КД имеется драйвер, который реализует стробируемый адресный прием данных и инструкций и передачу данных, согласование форматов данных и контроль обмена. Системные программы реализуются в КД и инициируются либо управляющей программой, либо наблюдателем с дисплейного пульта. К ним относятся программы вычисления видимых мест звезд с учетом рефракции, вычисления отсчетов разделенного круга с учетом ошибок делений, программа

определения положения звезд в системе координат окулярного микрометра. Сюда же относятся программы определения и исследования инструментальных параметров. Монитор системы позволяет наблюдателю-оператору следить за ходом выполнения программ и управлять процессом наблюдений.

Наблюдения проводились с помощью управляющей программы, которая на основании заранее рассчитанных эфемерид звезд вечерового списка задает установочные данные для программы УК, разрешает работу по внутренним часам комплекса, осуществляет обработку данных, поступающих от регистрирующих устройств, производит запись данных на магнитную ленту. Для контроля основная информация, а именно порядковый номер регистрации, звездная величина, спектральный класс; условия наблюдений: температура, давление, влажность; данные наблюдений: отсчеты лимба, максимальная и минимальная скорость счета фотонов (отношение сигнал/шум), координаты объекта в системе окулярного микрометра, может быть выдана на принтер. Аналогичная информация выдавалась на экран дисплея. Управляющая программа на основании данных, получаемых из УК и результатов обработки отсчетов регистрирующих устройств проводит анализ на сбой комплекса. Причина возникновения сбоя или нештатный режим работы комплекса выводятся на экран дисплея и сопровождаются звуковым сигналом. В управляющую программу кроме процедур управления и обработки наблюдений входят процедуры определения параметров инструмента по автоколлимационным измерениям. Кроме управляющей программы в ПО процесса данных входила программа для оперативного контроля системы делений лимба, программы вычисления эфемерид и исходных данных.

В качестве примера рассмотрим алгоритм функционирования СПУ ГМК на вечер наблюдений, который в общих чертах представлен на рис.4.8.

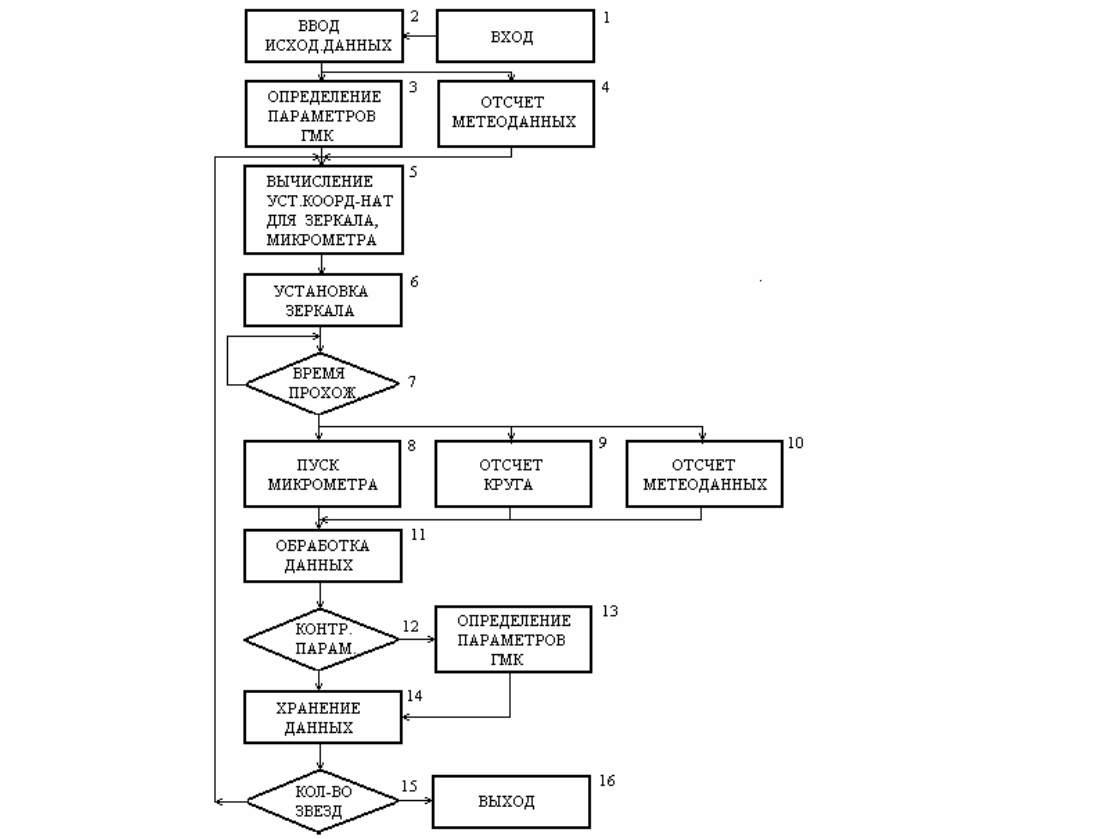

Рис.4.8. Обобщенный алгоритм работы СПУ ГМК в режиме наблюдений.

Предварительная подготовка к наблюдениям выполняется с помощью КД для блока 2 (вычисление видимых мест звезд, рефракции). Здесь же вводятся параметры, сохраняющие постоянство в течении вечера наблюдений. В блоке 3 определяются параметры инструмента, необходимые для определения положений звезд по материалу наблюдений относительный азимут зеркала и коллимация зеркала, наклонность главных труб и зеркала, нуль-пункты окулярных микрометров и главных труб и разделенного круга. С учетом условий наблюдений и поведения инструмента КД задает частоту определения параметров инструмента и интегрирует их на время наблюдения каждой звезды (блоки 12, 13). Метеоданные (главным образом температура) определяются на каждой звезде (блок 10). Фактически выполнение всех функций инструментом контролируется микро-ЭВМ, что обеспечивает безошибочную и надежную эксплуатацию. Общее время на наблюдение, обработку и вывод информации для одной звезды не превышает 1,5 минут, а в перспективе оно может быть сокращено до одной минуты.

В целом, программное обеспечение измерительного комплекса горизонтального меридианного круга включало набор программ: программы для определения готовности ГМК к наблюдениям (тест-программы), основную управляющую программу для наблюдения звезд, программы для проведения различных исследований ГМК и, наконец, программы для обработки наблюдений. В течение вечера работали две первые группы программ и выборочно программы из 3-й группы для определения в начале и конце вечера медленноменяющихся параметров инструмента. Более часто определялись четыре параметра - наклонность трубы, относительный азимут,

наклон зеркала и нуль-пункт разделенного круга. Контрольная обработка выполненных измерений производится сразу, либо на следующий день после наблюдений.

4.2. Теория ГМК.

4.2.1. Прямые восхождения.

Формула приведения наблюдений на меридиан для случая наблюдения прямых восхождений в классической форме интересна тем, что при выводе ее, ГМК рассматривается как обычный классический меридианный круг. Все редукционные величины даются относительно безколлимационной плоскости зеркала, то есть плоскости, перпендикулярной оси вращения зеркала, определяемой центрами цапф. А именно: к - азимут горизонтальной оси зеркала - угол между безколлимационной плоскостью зеркала и меридианной плоскостью, к>0, если западный конец горизонтальной оси смещен к точке юга, i - наклонность горизонтальной оси вращения зеркала - угол между осью вращения и плоскостью горизонта. Считаем i>0, если западный конец горизонтальной оси выше восточного; c - коллимация зеркала - угол между нормалью к отражательной поверхности зеркала и безколлимационной плоскостью. Считаем c>0, если нормаль отклоняется к востоку от безколлимационной плоскости; $к_N$' , $к_S$ ' азимуты труб (северной - N, южной - S) - угол между визирной осью трубы и меридианной плоскостью. Считаем $к_N$' >0 и $к_S$'>0 , если трубы относительно меридиана повернуты в горизонтальной плоскости против часовой стрелки; i_N' , i_S '- наклонность труб (N и S) - угол между визирной осью трубы и плоскостью горизонта. Считаем; i_N', i_S '>0, если окулярный конец трубы выше объективного; $\mu = k - k'$ -относительный азимут зеркала - угол между безколлимационной плоскостью зеркала и визирной осью трубы.

Применительно к пулковскому ГМК формула приведения на меридиан принимает вид:
для N трубы телескопа:

$$\Delta T = i\cos(\varphi \mp \delta)\sec\delta + k\sin(\varphi \mp \delta)\sec\delta \mp \mu_n \sec\delta \pm 2c\cos(45° + \frac{\varphi - \delta}{2})\sec\delta, \quad (4.3)$$

$$(45° - 90° + \frac{\varphi + \delta}{2})$$

для S трубы:

$$\Delta T = i\cos(\varphi\, m\delta)\sec\delta + k\sin(\varphi\, m\delta)\sec\delta\, m\mu_s \sec\delta \pm 2c\cos(45° - \frac{\varphi - \delta}{2})\sec\delta, \quad (4.4)$$

$$(45° + 90° - \frac{\varphi + \delta}{2})$$

где ΔT - редукция на меридиан, δ - склонение звезд, φ - широта инструмента. Верхние знаки и выражения в скобках относятся к наблюдениям звезд в верхней кульминации, нижние - к наблюдениям в нижней кульминации.

4.2.2. Склонения.

Определение склонений, как известно, сводится к получению из наблюдений зенитных расстояний Z. Формулу для вычисления зенитного расстояния можно представить в виде:

$$\begin{aligned} Z_n &= (\pm 2M_l^N \pm m_N + r) \mp (2M_0^N + i_N^Б) \mp 90°, \\ Z_S &= (\pm 2M_l^S \mp m_S + r) \mp (2M_0^S + i_S^Б) \mp 270°, \end{aligned} \quad (4.5)$$

где $M_l^{N,S}$ - отсчеты лимба по 4-м микроскопам при установке зеркала на звезду для наблюдений в N или S трубу, $M_0^{N,S}$ и $i'_{N,S}$ - значение нуль-пункта лимба и наклонности N и S труб, $m_{N,S}$ - отсчеты окулярных микроскопов соответствующих труб, r - табличная рефракция. Верхние знаки относятся к случаю $\delta<\varphi$, нижние к $\delta>\varphi$, верхние кульминации.

В обоих случаях влиянием членов 3-го порядка можно пренебречь при наблюдениях до склонений 89^0.

4.3. Результаты исследований ГМК.

Проведенные исследования пулковского ГМК посредством автоколлимационных измерений и наблюдений прямых восхождений и склонений звезд позволили с новых позиций оценить возможности этой схемы меридианного инструмента.

1) Центральный узел ГМК включает металлическое зеркало с лимбом и цапфами несомненно является самым ответственным за систему инструмента узлом. Замена вращающейся трубы на компактное зеркало позволяло рассчитывать на существенное уменьшение эффекта астрономического гнутия, достигающего в классических меридианных кругах величины 1”-2”.

   Действительно, проведенные при наблюдениях прямых восхождений и склонений исследования центрального узла (коллимация и гнутие зеркала) показали ожидаемые результаты. О стабильности формы металлического зеркала в горизонтальной плоскости можно судить по поведению коллимации зеркала.

   $c_1 = -0.”29 + 0.”0040(t^0 C + 0.^0 7) - 0.”100(T-T_0)$

   $c_2 = -0.”85 - 0.”0045(t^0 C + 0.^0 7) + 0.”060(T-T_0)$,

   где $t^0 C$ - температура воздуха в градусах, $T_0 = 1969.75$, T - эпоха наблюдений, выраженная в годах, c_1, c_2 - коллимация для двух поверхностей зеркала.

   Была получена уверенная корреляционная связь коллимации с сезонным ходом температуры, порядка $0”.004/1^0$C. Изменение коллимации в зависимости от суточного хода температуры не были обнаружены. Таким образом, форма металлического зеркала в горизонтальной плоскости устойчива и слабо зависима от температуры. Линейное изменение значений c_1, c_2 со временем может быть обусловлено остаточной неупругой деформацией зеркала, вызванной старением блока зеркала, а также необратимыми изменениями структуры зеркала, работающего в переменном температурном поле.

В вертикальной плоскости поведение зеркала более сложное. Под гнутием меридианного круга горизонтальной конструкции надо понимать изменение положения проекции нормали к плоскости зеркала на разделенный круг, деформации самого лимба, а также изменение суммы аберраций, приводящих к смещению изображений, вызванных изменением характеристик оптической системы “зеркало-объектив” при вращении зеркала. Последние имеют место при отклонении отражающей поверхности от плоскости. При рассмотрении эффекта гнутия на пулковском ГМК следует иметь в виду, что наличие неподвижной трубы не связанной механически с визирной осью полностью исключают влияние ее деформаций, т.е. гнутие трубы можно исключить из рассмотрения.

Учитывая реальные упругие деформации стеклянного лимба ГМК (диаметр внешний 400 мм, диаметр внутреннего отверстия 100 мм, толщина 15 мм, удельный вес стекла КВ $2{,}21 \times 10^{-3}$ кгс/см^3 и принимая однородность физических свойств стекла по всему объему), можно получить, что при симметричном расположении отсчетных микроскопов относительно вертикали влияние деформаций лимба на полный отсчет круга будет близким к нулю (≤0.″01).

Расчетная величина деформаций зеркала под действием силы тяжести в меридианной плоскости не превосходит величины характеризуемой стрелой прогиба 0.05 мкм на диаметр зеркала, равный 300 мм. Эти деформации приводят к появлению гнутия, изменяющегося по закону Asin2Z, где A=0”.01. Поскольку прогиб отражающей поверхности зеркала ведет к расфокусировке изображения в 1985г. были проведены на ГМК многочисленные измерения рафокусировки методом “ножа Фуко” при установке зеркала на различных зенитных расстояниях. Для этой цели было изготовлено эталонное плоское зеркало и специальная ферма для его установки над рабочим зеркалом ГМК на различных зенитных углах. В результате проведенных исследований было установлено, что в пределах точности определения положения плоскости фокусировки (±0.2-±0.5 мм) деформации зеркала под действием силы тяжести не превышали расчетную величину.

Поскольку ось вращения зеркала ГМК не совпадает с его отражающей поверхностью, проекция оптической оси объектива трубы при вращении зеркала скользит по отражающей поверхности, что при неплоскостности отражающей поверхности приводит к повороту нормали в точке на оптической оси относительно нормали в центре зеркала на угол: $\gamma = \frac{180° \cdot l}{\pi \cdot R} = \frac{180° \cdot 2k \cdot l}{\pi \cdot r^2}$. Здесь R - радиус кривизны отражающей поверхности, к - стрела прогиба на диаметр зеркала Д=2r, l - величина смещения проекции оптической оси относительно центра отражающей поверхности. Иными словами при некачественном изготовлении отражающей поверхности зеркала, наличии некоторого радиуса кривизны возникает эффект подобный гнутию, изменяющийся линейно с зенитным расстоянием. При учете параметров зеркала ГМК (r=150 мм, L=92 мм) величина деформации может быть представлена формулой: $\gamma'' = 1'',687 \cdot k\left(\sin 45° - \sinh\right) \cdot \sec h$. Если же учесть, что сферичность реального зеркала посредством которого проводились исследования

системы склонений ГМК не превышала $k \leq 0.5$ мкм в меридиональной плоскости (по данным интерферометрических измерений), то величина поправки за сферичность зеркала может быть представлена приближенной формулой: γ”≈(0”.007/угл.градус)Z, где Z - зенитное расстояние в градусах.

Таким образом, в результате наблюдений необходимо вводить поправки за неплоскостность зеркала, а в случае наблюдений по всей доступной дуге меридиана в одну трубу еще и поправки за расфокусировку в зоне виньетирования объектива краями зеркала. Поправки не требуются при высококачественном изготовлении поверхности зеркала. Поправки не требуются при высококачественном изготовлении поверхности зеркала. Как видно из приведенных формул для этого точность отражающей поверхности зеркала должна быть не ниже 0.1 длины волны или 0.2 интерференционной полосы света.

Оценка термических деформаций зеркала - теплового клина в меридианной плоскости и искривления отражающей поверхности под действием температурного градиента по толщине зеркала показала, что их можно не принимать во внимание при градиенте температуры на диаметр зеркала в меридианной плоскости не более 0°.1С. Измерения распределения температуры на зеркале ГМК показали, что это условие реальное.

Как недостаток ГМК обычно отмечают удвоение ошибок, связанных с отсчетами разделенного круга, с неправильностями цапф и отражающей поверхности зеркала. Эти особенности ГМК не имеют принципиального характера, а их влияние зависит от уровня технологии, точнее, от качества изготовления зеркала, цапф, от точности разделенного круга. Ошибки цапф Пулковского ГМК при наблюдении прямых восхождений были тщательно исследованы и учтены. Впоследствии они были существенно уменьшены до пренебрежимо малых величин за счет высокого качества изготовления (до 0.1 мкм).

2) Отсчетная система круга, как уже отмечалось, показала высокую точность, порядка, ±0”.02 по четырем микроскопам. Если учесть еще возможность полного исследования и оперативного контроля за стабильностью системы делений круга в автоматическом режиме, то становится ясным, что удвоение ошибок, связанных с отсчетами разделенного круга не является недостатком ГМК, поскольку оно полностью исключается.

Для определения поправок всех делений лимба ГМК был выбран модифицированный метод розеток, предложенный бразильским ученым Беневидшоном-Соарошом и Божко. В основе этой модификации лежит известная разновидность метода розеток Леви-Зверева. Выбранный метод отличается малым числом установок угла между диаметрами (количество апертур розеток m=3), малым числом диаметров равным двум, равноточностью получаемых поправок диаметров и высокой эффективностью. Одним из главных достоинств метода Беневидоша-Соареша и Божко является наличие соответствующей решению методом наименьших квадратов ковариационной матрицы в законченном виде и на этом основании выбор параметров системы уравнений может производиться исходя из статистических свойств решения.

Для лимба ГМК, с учетом возможности установки определенных углов между отсчетными микроскопами были выбраны три розетки с углами (апертурами) 33°20’ , 33°45’ и 42°00’. Предварительно, большое внимание

было уделено изучению параметров отсчетных микроскопов (цена деления счетного импульса, эксцентриситет и точность установки микроскопов на одном диаметре, ориентировка микроскопов) для исключения или учета их влияния на результаты определения ошибок делений. Реальные исследования ошибок делений лимба ГМК проводились осенью 1984 г. при относительно малых суточных колебаниях температуры воздуха (от +4° до +9°С). Такие условия измерений обеспечили постоянство и надежный контроль величины угла между диаметрами как необходимого условия метода розеток. Измерения производились в автоматическом режиме, при двукратных отсчетах каждого микроскопа и удвоенных розетках. Двойные розетки выполнялись при положении лимба, отличающихся на 180°, для контроля и учета влияния ориентировки микроскопов. В результате, общее количество измерений достигло 104 тыс., которые были выполнены за 156 часов, с учетом времени на установку микроскопов и их “успокоение” полный период измерений занял три недели. Однако, при более четкой организации исследований этот срок может быть сокращен почти втрое. Данные измерений регистрировались в виде отсчетов круга и обрабатывались впоследствии на ЭВМ. Общее время обработки данных измерений вплоть до получения поправок диаметров может быть сведено к 3-4 часам. На рис.4.9 приведена круговая диаграмма поправок диаметров для средней температуры измерений порядка +6°. Каждая из поправок получена с точностью ±0”.02.

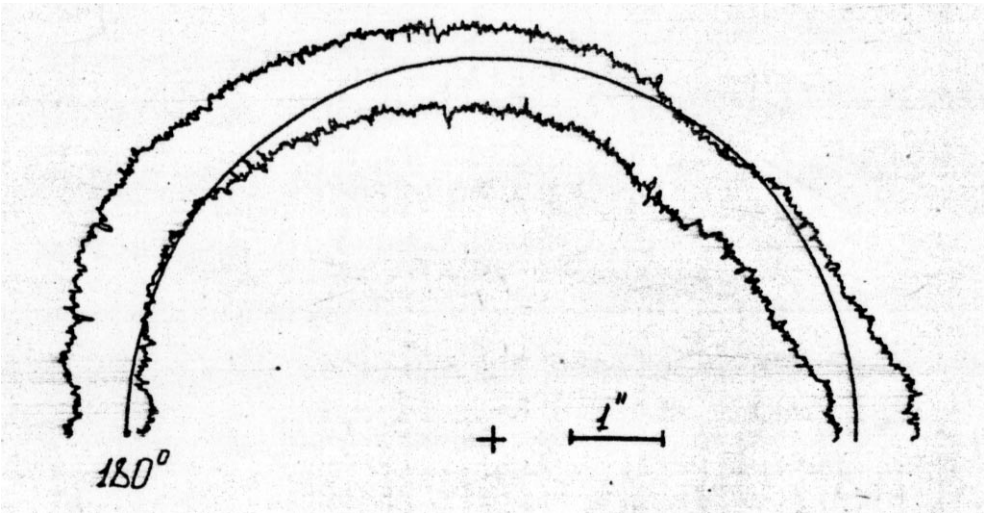

Рис. 4.9. Круговая диаграмма поправок диаметров лимба пулковского ГМК.

Кривая на рис.4.9 показывает, что лимб ГМК имеет две системы штрихов, сдвинутых одна относительно другой на 0”.85. Появление такой “ступеньки” также как и эллиптичность можно объяснить, по-видимому, особенностями нанесения штриховой меры на стеклянный диск.

Таким образом, проведенные исследования ошибок делений лимба ГМК новым методом Беневидоша-Соареша и Божко позволили получить высокоточную систему поправок делений лимба необходимых для учета систематических ошибок при определении склонений звезд.

Оперативный контроль ошибок делений. Быстродействие и точность АОС круга ГМК позволили реально рассмотреть задачу определения и постоянного контроля поправок 6-ти градусных диаметров лимба. Эта возможность возникла попутно при определении поправок всех 5-ти минутных делений лимба ГМК. Розетка с углом 42°00’ позволяет определить 6-ти градусные поправки диаметров по всей окружности при установках лимба, начиная с произвольно выбранного начала - вершины розетки, за которую принимался отсчет 0°00’. На все операции по установки лимба и отсчеты микроскопов затрачивалось 17 минут. Столь короткое время позволяло рассчитывать на постоянство угла между диаметрами с высокой степенью точности. Для оценки систематической составляющей ошибок делений, уравнения розетки с углом 42° были решены цепным способом при условии: сумма поправок диаметров розетки равна нулю. Уравнения розетки можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned}
\Delta_0 - \Delta_{42} &= \beta_1 - \beta_{\tilde{n}\,\varsigma} = l_1 \\
\Delta_{42} - \Delta_{84} &= \beta_2 - \beta_{cp} = l_2 \\
- \quad &- \quad - \quad - \qquad (4.6) \\
\Delta_{96} - \Delta_{138} &= \beta_{29} - \beta_{cp} = l_{29} \\
\Delta_{138} - \Delta_0 &= \beta_{30} - \beta_{cp} = l_{30}
\end{aligned}$$

где β_i - последовательные измерения угла между диаметрами разными участками лимба, Δ_k - поправка к-того диаметра, $\beta_{\tilde{n}p} = \frac{1}{30}\sum \beta_i$.

При условии $\sum \Delta_k = 0$, получаем:

$$\Delta_0 = -\left(l_{30} + \frac{29}{30} l_{29} + \frac{28}{30} l_{28} + ... + \frac{2}{30} l_2 + \frac{1}{30} l_1 \right) \quad \text{или}$$

$$\Delta_0 = l_1 + \frac{29}{30} l_2 + ... + \frac{2}{30} l_{29} + \frac{1}{30} l_{30}$$

С мая 1984 г. по апрель 1985 г. были выполнены измерения 18 розеток при температурах от +20° до -18°. Ошибка одного определения поправки диаметра, полученная по повторным значениям в группе розеток, измеренных при одинаковых условиях, в среднем оказалась равной ±0”.06. Сравнение поправок 6-градусных диаметров с результатами полного исследования, проведенного в это же время показало что, расхождения поправок не имеют систематического хода и не превышают случайных ошибок определения (ошибка определения поправки при полном исследовании равна ±0”.02).

Таким образом, предлагаемый способ исследования и контроля стабильности шестиградусных делений лимба имеет высокую точность, сравнимую с точностью полного исследования. Малая трудоемкость, простота обработки подчеркивают его преимущества при массовых определениях координат небесных объектов. Представляет интерес розетка с трехградусными диаметрами (угол между диаметрами - 33°00’, время измерения - 34 мин). Обнаруженные температурные зависимости поправок шестиградусных диаметров связаны, вероятно, с деформацией стеклянного лимба в металлической оправе и изменениями углов наклона микроскопов. Это определяет обязательный контроль системы делений и взаимной

ориентировки лимба и отсчетных микроскопов предложенными способами при длительных рядах наблюдений звезд.

Аналогичные исследования особенностей стеклянных кругов применяющиеся в качестве носителя штриховой меры на современных автоматическихъ меридианных кругах проводятся и за рубежом. В частности, на токийском РМС также получены данные о сезонных вариациях системы делений стеклянного лимба.

3) Наличие в меридиане двух неподвижных горизонтальных и направленных друг на друга труб позволило создать в схеме ГМК уникальную контрольную автоколлимационную систему, с помощью которой можно было следить за поведение ориентации зеркала и состоянием параметров инструмента. Исследования взаимной устойчивости труб ГМК по азимуту показали, что изменения угла между трубами с сезонными и суточными периодами коррелировала с температурой и составляли 0”.1/1С и 0”.07/1С, соответственно. Сезонные и суточные изменения наклонности труб составляли, соответственно, (1”.3-1”.7)/1С и (0”.30-0”.35)/1С. Взаимную стабильность труб по азимуту можно считать удовлетворительной, хотя есть резервы улучшения этого параметра. В частности, закладные детали объективов и окуляров, не имеющих механических связей с корпусами труб размещены несимметрично в верхних частях столбов фундаментов и сами столбы не защищены соответствующим образом от температурного влияния окружающей среды. Кроме того, наличие протяженного, теплоемкого павильона, расположение в нем обогреваемой кабины не способствовало установлению в инструменте однородного температурного поля, а отсюда и лучшей устойчивости инструмента. В целом, следует отметить, что устойчивость труб ГМК по азимуту сравнима с устойчивостью классических мир. Действительно, сезонные и поступательные изменения азимута труб ГМК в течение двух лет не превышали величин около 0.”4. Изменение наклонности труб ГМК особенно сезонного периода значительно больше тех значений, которые можно ожидать из простого пересчета эмпирических значений изменений наклонности горизонтальной оси классического МК на длиннофокусные трубы ГМК. Проведенные исследования ГМК выявили в качестве причины значительные деформации открытого фундамента ГМК под влиянием температуры окружающей среды, которые и приводили к изменению наклонности труб. Хотя эти изменения уверенно коррелируют с температурой фундамента и их можно учесть также с помощью маятникового зеркального горизонта тем не менее это является техническим недостатком ГМК, который можно устранить лишь путем переделки фундамента. Суточные изменения наклонности труб во время наблюдений звезд, так же как и изменения азимута зеркала тщательно учитывались посредством автоколлимационных изменений с маятниковым горизонтом, предусмотренных автоматическим режимом работы ГМК. Отметим также, что автоколлимационная система двух труб ГМК позволяет контролировать из наблюдений звезд азимут зеркала относительно труб, а также жесткость конструкции самого зеркала (вертикальный клин).

4) Исследование аномалий рефракции в павильоне ГМК помимо общих проблем, характерных для меридианных кругов и других конструкций

имеет свои особенности, на которых следует остановиться. Прежде всего, это наличие горизонтального хода лучей с различными условиями на двух участках: между зеркалом и объективом трубы и в самой трубе. Исследования на участке “зеркало-труба” показали, что повышение ошибки отсчета, обусловленное турбуленцией воздуха можно устранить путем введения на время автоколлимационных измерений параметров инструмента дополнительной экранирующей трубы. Устранение вертикального градиента в трубе осуществлялось на ГМК путем принудительной вентиляции воздуха в промежутке между внутренней и внешней станами трубы, которая позволяла выравнивать температуру воздуха внутри трубы до остаточного градиента, порядка несколько сотых градуса на диаметр и таким образом существенно уменьшить и стабилизировать возможное влияние аномальной рефракции внутри трубы. Таким образом, при соблюдении указанных выше условий, влияние аномальной рефракции на горизонтальном участке “зеркало-окуляр” может быть сведено к пренебрежимо малой величине, что позволяет исключить из перечня недостатков ГМК и этот эффект.

Следует также отметить, что обычно, возможность существования рефракционных аномалий на горизонтальном участке хода лучей между зеркалом и окулярным микрометром рассматривается как недостаток горизонтального меридианного инструмента. Однако, как следует из методики определения координат звезд на ГМК влияние этих рефракционных аномалий не зависит от зенитного расстояния наблюдаемой звезды и входит одинаковым образом в наблюдения звезд и в автоколлимационные измерения. Следовательно, при учете параметров ориентировки (наклонность труб и зеркала, относительный азимут зеркала и нуль-пункт разделенного круга) происходит исправление определяемых координат за влияние возможных рефракционных аномалий на горизонтальном участке. При этом важна идентичность условий наблюдений звезд и автоколлимационных измерений.

Необходимость устранения влияния аномалий рефракции в трубах меридианных инструментов остается по-прежнему актуальным. Кроме примененного на ГМК метода представляет интерес, предложенное Э. Хегом перемешивание воздуха непосредственно внутри трубы меридианного инструмента, заполнение труб инертными газами, но самым радикальным способом, устраняющим в принципе проблему влияния рефракции в трубе инструмента является ее полное вакуумирование.

5) О стабильности системы по прямому восхождению и склонению можно судить на основании большого материала наблюдений. Сезонные изменения системы ГМК не превышали значений ±0.”02- ±0.”05. Изменения температуры при этом достигали, около $\pm 30^0$C. Окончательная система ГМК по прямому восхождению и склонению (в смысле “каталог ГМК - опорный каталог FK5”) показала хорошее согласие с системами других каталогов северного неба и отражала с точностью ±0.”02- ±0.”03 ошибки опорного каталога FK5. Это свидетельствует о достаточно полном учете инструментальных ошибок ГМК и о надежной привязке системы ГМК к системе опорного каталога FK4.

Сравнение средних систематических разностей вида $(O\text{-}C)_{\alpha}$ и $(O\text{-}C)_{\alpha}\text{Cos}\,\delta$ в смысле (каталог – FK5) для ГМК с аналогичными данными для

АМЕ САМС, Бордо МК, РМС и АМК приведено на рис.1.1 и 1.2 (глава 1). Следует отметить, что по абсолютной величине система ГМК незначительна. За исключением одной точки на Z=55° уклонения не превышают 0.”1 по прямому восхождению и склонению. В пределах точности определения систематических разностей по α и δ можно говорить о близости кривой ГМК к результатам независимых наблюдений на других АМТ. Если же учесть, что согласие систематических кривых для трех автоматических МК (РМС-190 САМС и МК в Бордо) на уровне: ±0”.02-±0”.03, то можно считать, что систематическая точность ГМК того же порядка достигнута на значительно меньшем объеме наблюдений. Отсюда следует, что влияние ошибок ГМК инструментального характера (коллимация, ошибки цапф, гнутие и др.) несущественно, т.е. либо они учтены достаточно точно, либо малы.

4.4. Итоги наблюдений и перспективы ГМК.

4.4.1. Каталоги, полученные в 1970-90 годы.

Для оценки возможностей автоматического пулковского ГМК всего было отнаблюдено и получено 4 каталога положений звезд. В программе наблюдений 1970-1987 гг. были представлены в основном звезды из FK5 для исследования системы ГМК по прямому восхождению (каталог Pu(ГМК)70А) и склонению (каталог Pu(ГМК)82Д). В программу наблюдений 1988-90 гг. были включены избранные группы звезд из FK4, FK5, ФКС3 - каталог Pu(ГМК)88, а также список опорных звезд в площадках с внегалактическими радиоисточниками Pu(ГМК)88. Поскольку точность положений и собственных движений вновь полученных в FK5 звезд ниже, чем у ранее входящих в FK4 и поскольку собственные движения слабых звезд около 0”.3/100 в то время была актуальной задача перенаблюдений звезд FK5 в единой инструментальной системе с целью уточнения всей системы и улучшения ее однородности, тем более, что средняя эпоха наблюдений слабых звезд FK5 примерно 1940 г. Так как точный список всего FK5 в 1987 г. еще не был определен в программу ГМК были включены в качестве опорных 329 звезд (FK4) 4 -7 звездной величины, а также звезды FK4S (253 звезды) северной полусферы и звезды ФКС3 (229 звезд). Весь список включал 911 звезд, из которых 502 звезды вошли в каталог FK5.

Табл.4.1. Точность единичных наблюдений, выполненных на Пулковском ГМК в 1988-90 гг.

Наблюденные списки звезд	$\varepsilon_\alpha \cos\delta$.	ε_α .	Число звезд входящих в список	Число наблюдений одной звезды
Pu(ГМК)70А	$\pm 0^S.010(\sec Z)^{0.6}$		188	4.1
Pu(ГМК)82Д		$\pm 0".20 \sec Z$	224	4.0
Pu(ГМК)88	$\pm 0^S.017(\sec Z)^{0.6}$	$\pm 0".17(\sec Z)^{0.9}$	911	3.3
Pu(ГМК)89	$\pm 0^S.024(\sec Z)^{0.8}$	$\pm 0".20 \sec Z$	170	3.1

В среднем точность положений звезд в каталоге Pu(ГМК)70А составляет $\varepsilon_\alpha \cos\delta = \pm 0^S.005$. Поправки прямых восхождений квазиабсолютного каталога Pu(ГМК)70А были использованы при выводе системы прямых восхождений фундаментального каталога FK5.

Точность положений звезд в каталоге Pu(ГМК)82Д характеризуется ошибкой $\varepsilon_\delta = \pm 0''.11$.

Каталог прямых восхождений и склонений Pu(ГМК)88, составленный из звезд списков FK5Б, FK4S и ФКС3, полученный в единой инструментальной системе может быть использован для улучшения положений звезд в фундаментальном каталоге FK6. В среднем, точность положений звезд в каталоге Pu(ГМК)88 характеризуется ошибками $\varepsilon_\alpha \cos\delta = \pm 0^S.009$ и $\varepsilon_\delta = \pm 0''.08$.

Полученный каталог прямых восхождений и склонений 170 опорных звезд в 63 площадках вокруг радиоисточников Pu(ГМК)89 может быть использован для установления связи между опорными системами координат, базирующимися на радиоисточниках и оптических объектах. В среднем, точность положений звезд в каталоге Pu(ГМК)89 характеризуется ошибками $\varepsilon_\alpha \cos\delta = \pm 0^S.015$ и $\varepsilon_\delta = \pm 0''.12$ и является точным в систематическом отношении.

4.4.2. Перспективы ГМК - проект МАГИС.

Проведенные исследования пулковского ГМК позволили сделать следующие выводы по этой схеме меридианного инструмента. С одной стороны, окончательно подтверждены принципиальные достоинства горизонтальной конструкции, главный из которых: а) применение металлического, монолитного с осью зеркала значительно уменьшило ошибки, связанные с гнутием; б) неподвижно расположенные две трубы (при этом корпуса труб не связаны с объективами и окулярами) повышают устойчивость инструмента, создают возможность более полного контроля поведения параметров зеркала без введения дополнительных коллиматоров и мир. Неизменное положение трубы, позволяет использовать окулярные регистрирующие устройства без весовых и габаритных ограничений.

С другой стороны, недостатки отмечавшиеся ранее как принципиальные и значительные были либо сняты в ходе исследования из-за возможности учета их влияния, либо были переведены в разряд чисто технических проблем. Это относится к удвоению влияния ошибок цапф и отражающей поверхности зеркала, удвоению влияния ошибок делений лимба, к учету влияния павильонной рефракции на горизонтальном ходе лучей. К числу принципиальных недостатков ГМК следует отнести лишь отсутствие возможности постоянного контроля положения оси вращения зеркала. Иными словами, схема ГМК не позволяет во время наблюдений прохождений звезд через меридиан одновременно определять и ориентировку зеркала относительно труб и отвесной линии из автоколлимационных измерений. Но при хорошей устойчивости и плавных изменениях параметров ориентировки ГМК этот недостаток можно компенсировать дискретными высокоточными автоколлимационными определениями параметров

ориентировки и их последующим интерполированием на моменты наблюдений звезд. Тем более, что в полном объеме эта проблема еще не решена ни на одном из существующих меридианных инструментов.

МАГИС (Меридианный Автоматический Горизонтальный Инструмент) является улучшенной версией пулковского ГМК - первого автоматического МК в СНГ, на котором были получены высокоточные результаты определения положений звезд в систематическом положении до 0.”02-0.”03. В проекте МАГИС были учтены все слабые стороны конструкции ГМК и усилены его положительные. Схема МАГИС включает плоское зеркало, диаметром 300 мм, расположенное между двумя неподвижными, вакуумированными горизонтальными трубами (Д=190 мм, Ф=8000 мм). Предполагалось максимально автоматизировать процесс наблюдений, по существу, до уровня телескопа-робота.

Осуществление проекта МАГИС в Пулковской обсерватории началось в 1989 г. Результаты первых исследований отдельных узлов МАГИС были многообещающими. В частности, стабильность металлокерамического зеркала оказалась достаточно высокой - изменения коллимации зеркала (то есть, угла между двумя отражающими поверхностями) не превышали $0.”02/1^0$C. Создана опытная система сбора метеоданных, устройство точного времени, которые в полном объеме или по элементам прошли натурные испытания и работают на николаевском АМК. В конце 90-х годов на опытном экземпляре МАГИСа с новым ПЗС окулярным микрометром были начаты опытные наблюдения.

Ниже приведена схема МАГИСА (рис.4.10) и некоторые данные о ПЗС окулярном регистрирующем микрометре:

- размеры ПЗС матрицы 15.7x20.7 мм;
- количество пикселей в матрице 768x580 или 1024x768;
- размер пиксела 27x27 мкм;
- разрядность АЦП 16 бит;
- спектральный диапазон приемников в нм 400 ÷1000;
- наборы стеклянных фильтров позволяют наблюдать объекты в полосах B, V, R фотометрической системы Джонсона;
- рабочие режимы: дрейфовый и кадровый;
- температурный режим: охлаждение по отношению к температуре воздуха на 60°C;

Система отсчета лимба МАГИСа включает 4 четыре основных ПЗС микроскопа, расположенных под углом 45^0 к горизонту и два дополнительных - для исследования ошибок деления лимба, состоящих из тубуса с микрообъективом и корпуса. Каждый микроскоп снабжен осветителем. Анализирующим элементом отсчетного микроскопа является сканирующий узел, расположенный в корпусе и представляющий собой ПЗС матрицу. Матрицы микроскопов МАГИС имеют размер пиксела 10x10 мкм, размер светочувствительной области 4.48x3.36 мм. Лимбы (подобно аналогичным с ГМК) имеют диаметр разделенной окружности 412,5 мм, толщиной 16 мм, штрихи шириной 10 мкм и длиной 1 мм нанесенные на стекле К8 через 5 угловых минут (0.3 мкм).

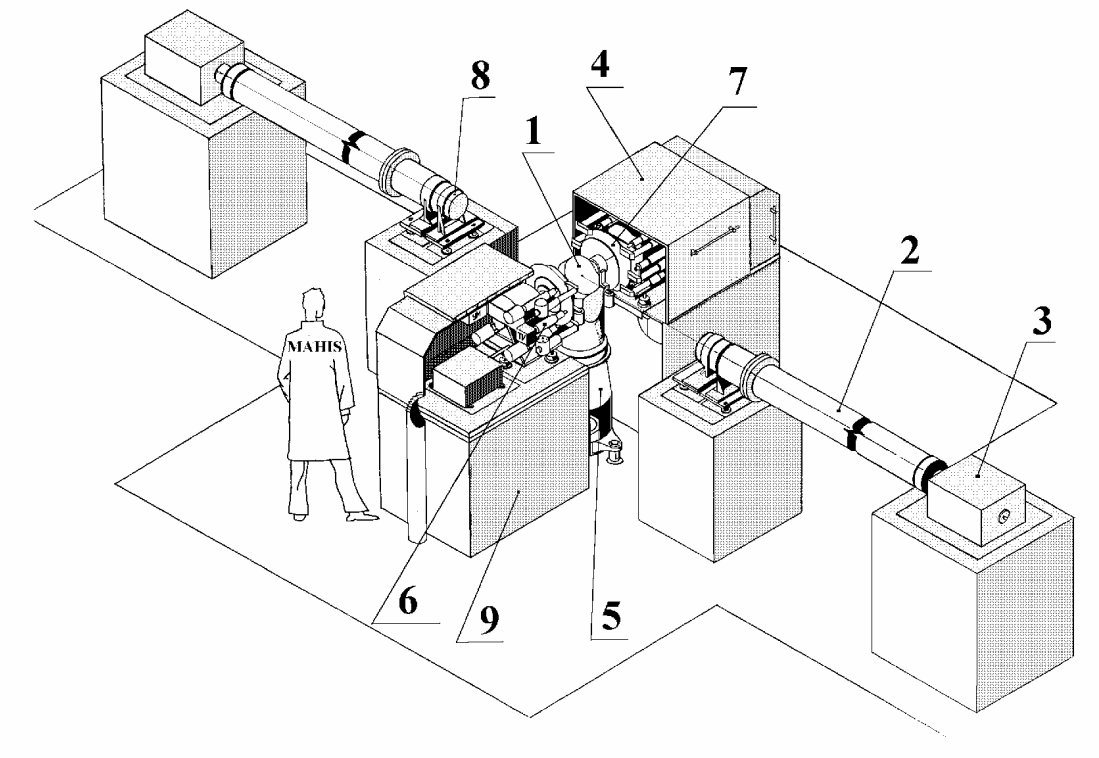

Рис.4.10. Общий вид опытного экземпляра МАГИС.

Г Л А В А 5

МК ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ В ПЕРВОМ ВЕРТИКАЛЕ

Разработка и создание нового телескопа для высокоточных определений угловых координат небесных объектов стало особенно актуальным в 80-е годы когда выяснилось, что наземная позиционная астрономия отстает в международных астрометрических программах из-за появления космической астрометрии, а существующая инструментальная база устарела. В то же время уровень техники обеспечивал возможность создания автоматического меридианного телескопа в качестве современного инструментально-измерительного комплекса с программным управлением.

Впервые предложение о горизонтальном меридианном инструменте в первом вертикале было высказано еще Штейнгелем. Последующие предложения можно разделить конструктивно на две группы. В первой из них труба расположена неподвижно в первом вертикале, вращается лишь оптический узел (призма, эккер, зеркало). Во второй группе оптический узел тесно связан с трубой и вращается вместе с ней вокруг горизонтальной оси. Высказывались предложения использовать не только линзовую, но и зеркально-линзовую оптику. Опытная и теоретическая проработка схемы ГМИ в первом вертикале была выполнена в Голосеевской астрономической обсерватории К.Е. Скориком и А.С.Хариным; схема так называемого “стеклянного” меридианного круга (GMK) была построена Э. Хегом в Копенгагенской обсерватории.

Новый импульс получило исследование схемы ГМИ в первом вертикале после нахождения оригинального способа связи инструмента с мирой в первом вертикале. В настоящее время экспериментальные экземпляры ГМИ в первом вертикале созданы и проходят испытания в астрономических обсерваториях Киева и Николаева, а также в Китае (Шаньси астрономическая обсерватория) в сотрудничестве с Брорфельдской обсерваторией (Дания).

5.1. Принципиальная схема и особенности АМК (НАО, Украина).

Впервые о принципиальной схеме аксиального меридианного круга, являющегося основой инструментально-измерительного комплекса было сообщено Г.И. Пинигиным и О.Е. Шорниковым еще в 1979 году на пленарном заседании секции астрометрии Астрономического совета АН СССР, в Киеве.

В отличие от общепринятой, традиционной конструкции меридианного круга (МК) принципиальные особенности телескопа АМК состоят в том, что его горизонтальная труба расположена в первом вертикале, а объектив трубы жестко соединен с оптическим узлом в виде призмы (куба, эккера, зеркала). Отражающая (диагональная) поверхность оптического узла наклонена под углом 45 градусов к визирной оси трубы. Для наблюдения звезды в меридиане труба вместе с оптическим узлом поворачивается в лагерах вокруг своей оси посредством механизма наведения, устанавливаясь по зенитному расстоянию

таким образом, чтобы изображение звезды после отражения от диагональной поверхности оптического узла поступало в окулярный микрометр. Одновременно через полупрозрачный оптический узел или центральное отверстие в нем туда же передается и изображение световой марки неподвижного длиннофокусного коллиматора (миры). Измеряя в окулярном микрометре расстояние между изображениями звезды и миры, можно осуществлять постоянный контроль положения каждой звезды относительно горизонтального опорного направления. Поскольку измерения относительные, то все изменения параметров ориентировки визирной оси трубы из-за ошибок цапф, весовых и термических деформаций отдельных частей и всего телескопа в целом, изменений нуль - пунктов окулярного микрометра и др. не влияют на результаты измерений. Положение оптического узла относительно миры контролируется путем регистрации отраженного от его боковой грани изображения световой марки, для чего мира снабжена автоколлимационным микрометром. В этом заключен основной принцип АМК, на который после его реализации был получен патент (авторы Г.И. Пинигин и А.В. Шульга).

Дополнительно, с целью осуществления непрерывного контроля положения каждой звезды относительно направления отвесной линии был разработан технический проект введения в схему АМК отсчета разделенного круга с, так называемым, самоустанавливающимся нуль - пунктом. Таким образом, схема АМК имела методическую завершенность в смысле постоянной привязки наблюдений небесных объектов по обеим координатам к опорным направлениям.

Была разработана общая теория АМК, включающая методы исследований поведения параметров АМК, наблюдений и их последующей обработки с целью получения прямых восхождений и склонений небесных объектов. Расчеты показали возможность снижения совокупной систематической инструментальной ошибки наблюдений на АМК до уровня 0.″01-0.″02 по обеим координатам. Позднее, эта теория была уточнена для окончательного варианта АМК.

После широкого обсуждения схемы АМК в Главной (пулковской) астрономической обсерватории (ГАО) РАН было решено строить АМК силами Николаевского отделения ГАО (после 1990 года - Николаевская астрономическая обсерватория - НАО) при активном содействии Пулковской обсерватории и разместить его на научной площадке НАО. Аксиальный меридианный круг (АМК) предназначен для определения координат (прямых восхождений и склонений) небесных объектов посредством наблюдений звезд до 14-й величины, больших и малых планет, звездообразных и дискообразных, а также неподвижных объектов; предусмотрена возможность фотометрирования наблюдаемых объектов в полосах B,V,R. За период 1980-98 гг. аксиальный меридианный круг АМК был разработан, изготовлен и принял участие в трехлетних наблюдениях первого каталога слабых звезд. В своем становлении инструмент выдержал несколько этапов, включая проектные и конструкторские работы, создание экспериментального визуального экземпляра, проведение натурных исследований и, наконец, создание рабочего экземпляра, который представляет астрометрический телескоп нового типа для высокоточных определений угловых координат небесных объектов и является, по существу, современным инструментально-измерительным комплексом с

программным управлением. На последнем этапе основные работы выполнены А.Н. Ковальчуком, Ю.И. Процюком, А.В. Шульгой.

5.2. Описание, основные характеристики АМК.

Приведем данные о действующем АМК, ограничиваясь кратким описанием его основных узлов и полученных характеристик в ходе испытаний и наблюдений. Современная схема АМК включает горизонтальный телескоп (Д= 180мм, F=2480 мм) в первом вертикале и неподвижный вакуумированный коллиматор (Д=180мм, F=12360мм), (см. рис.5.1 и 5.2).

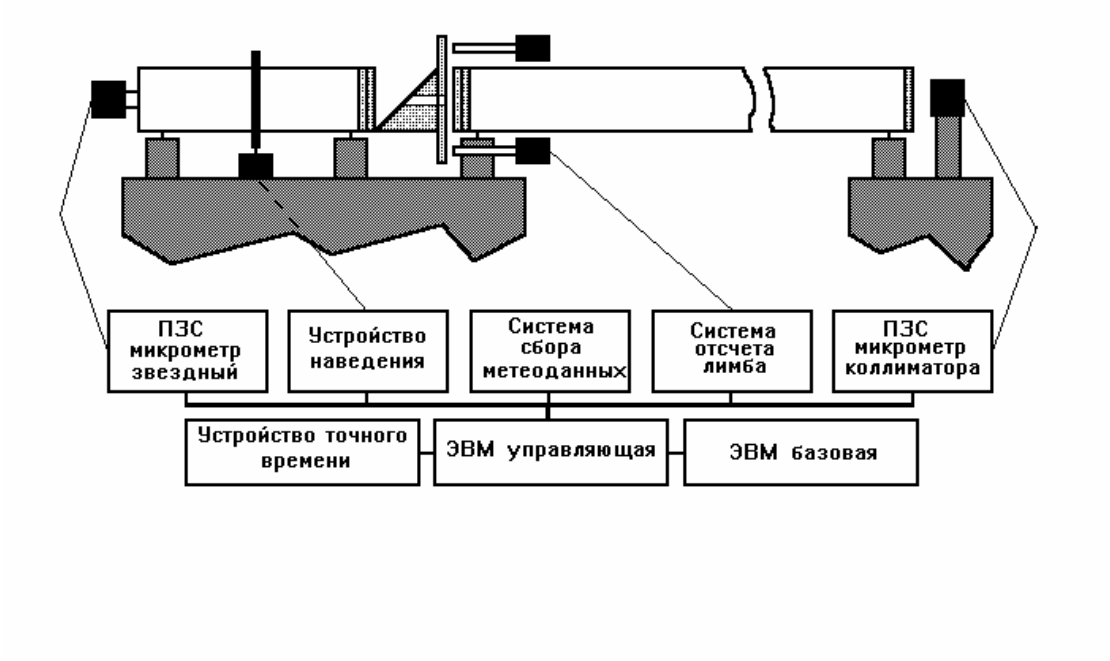

Рис.5.1. Принципиальная схема Николаевского АМК с программным управлением.

С объективом телескопа жестко связан оптический узел - ситалловый цилиндр, усеченный под 45 градусов таким образом, чтобы его диагональная плоскость отражала световые лучи звезд в объектив телескопа и далее в ПЗС окулярный микрометр телескопа для регистрации прохождений изображений звезд через плоскость меридиана. Через центральное отверстие цилиндра, диаметром 70 мм можно также наблюдать марку неподвижного длиннофокусного коллиматора и регистрировать ее положение в окулярном микрометре АМК. Оправа цилиндра выполнена в виде опорной рамы таким образом, чтобы обеспечить стабильность его геометрических параметров и неизменность положения относительно телескопа при различных установках телескопа по зенитному расстоянию и изменениях температуры. Инструмент установлен на массивном фундаменте, в раздвижном павильоне, так чтобы во время наблюдений телескоп был полностью открыт.

Двухкоординатный окулярный микрометр АМК был создан на основе ПЗС-матрицы. В первом варианте была использована малоформатная матрица ФППЗ-13М (288 × 256 пикселей размером 24 × 32 мкм) производства предприятия “СИЛАР” (ранее НПО “Электрон”, Санкт-Петербург). Совместно с предприятием “САТЕЛ” (Глухов, Украина) для матрицы был изготовлен

вакуумный холодильник на базе 4-х каскадной термоэлектрической батареи ТЕМО, который обеспечил перепад температур в -80 градусов относительно температуры окружающей среды, что позволило значительно уменьшить тепловые шумы матрицы. Охлаждаемый таким образом светоприемник обеспечил наблюдения небесных объектов до 14-ой звездной величины. Схема управления светоприемником позволяла проводить наблюдения как в режиме «дрейфового сканирования», так и в режиме "неподвижного кадра", например, для наблюдений опорных и автоколлимационных марок с необходимым уровнем точности. Аппаратные и программные средства ПЗС микрометра были построены таким образом, что наблюдатель имел возможность оперативно изменять режимы работы ПЗС и характеристики тракта обработки видеосигнала. Это осуществлялось либо непосредственно с пульта (клавиатуры) управляющей ЭВМ, либо посредством управляющей программы. Такой подход позволил полностью автоматизировать процесс регистрации и одновременно адаптировать режимы работы окулярного микрометра под выполняемую программу и условия наблюдений. Точность измерений положений звезд с малоформатной матрицей составила $\pm 0.''04$ для объектов до 12-й звездной величины и $\pm 0.''12$ до 14-й величины, включительно (рис.2.1 в гл.2). Окулярный микрометр со светоприемником ФППЗ-13М использовался во время регулярных наблюдений на АМК в 1996-98 годах. Второй упрощенный экземпляр окулярного микрометра на ПЗС ФППЗ-13М был установлен в качестве автоколлимационного микрометра длиннофокусного вакуумированного коллиматора и обеспечивал точность измерений положения световой марки на уровне $\pm 0.''02$.

В 1998 году для окулярного звездного микрометра АМК была изготовлена новая камера с крупноформатной ПЗС - матрицы ISD 017 (1040×1160 пикселей размером 16×16 мкм) производства НПП "Электрон-Оптроник" (Санкт-Петербург). Проверка возможностей звездного микрометра АМК с новой ПЗС камерой подтвердила его более лучшие возможности - предельная звездная величина - 16^{m}, точность регистрации небесных объектов до 16-й величины в диапазоне $\pm 0.''04$ - $\pm 0.''20$ (рис.2.1). Разработка новой версии ПЗС микрометра для АМК была вызвана необходимостью использования широкоформатной матрицы для наблюдения больших угловых полей, а также возможностью наблюдений в разных участках спектра. Помимо замены ПЗС матрицы значительные улучшения внесены в электронику ПЗС микрометра: полностью изменена интерфейсная часть, что на порядок повысило скорость обмена информацией между электронными узлами микрометра и управляющей ЭВМ; увеличена разрядность АЦП до 12 бит для повышения точности преобразования сигнала; опорный синхрогенератор вместе с источниками опорных напряжений помещен в термостат, что исключает температурный дрейф режимов работы и в конечном итоге повышает точность определения координат и звездных величин; добавлен блок оптических цветных фильтров, который оснащен схемой автоматической установки нужного фильтра; значительно расширен диапазон значений устанавливаемых экспозиций в кадровом режиме - число градаций коэффициента усиления увеличено с 16 до 255 и др. Разработанная методика фотометрических наблюдений в трех участках спектра (BVR) позволяет получать звездные величины наблюдаемых объектов с точностью $0^{m}.05$, а также хроматические поправки.

Поскольку рабочий экземпляр отсчета круга с самоустанавливающимся нуль-пунктом не удалось реализовать из-за финансовых сложностей, то в 1994 году была разработана и изготовлена система автоматического отсчета разделенного круга (АОС), в основу которой положен принцип механического сканирования делений лимба и использования растрового датчика для измерения положений сканирующего узла. Система АОС (стеклянный лимб диаметром 412 мм, стекло типа К8, лимб имеет 4320 делений ценой 5 угловых минут) состоит из 4-х сканирующих фотоэлектрических микроскопов и управляющей электроники. На АМК АОС была установлена после получения электроники из астрономической обсерватории им. В.П.Энгельгардта (Казанский университет) и оптико-механических узлов из Пулковской обсерватории. В процессе доработки, наладки и исследования АОС были разработаны методы точной установки отсчетных микроскопов АОС перпендикулярно плоскости лимба и отдельного закрепления на трехточечных закладных опорах объектива, барабана и вакуумной трубы. Такая конструкция обеспечила необходимый уровень регулировок и стабильность фиксации этих узлов. Система АОС обеспечивала точность единичного отсчета круга по всем микроскопам ±0."02 за 16 секунд времени. Установка трубы телескопа на заданное зенитное расстояние производится шаговым двигателем с точностью 4" и быстродействии 1.5 градус/сек. Надежность действующего варианта АОС подтверждается как тем, что первые экземпляры аналогичных АОС успешно работают на телескопах Пулковской обсерватории (Горизонтальном меридианном круге и Фотографическом вертикальном круге), так и безотказной работой во время регулярных наблюдений в 1996-98 гг. создании отсчета разделенного круга АМК с ПЗС регистрацией.

В систему программного управления входят также служба времени, система сбора метеоданных и ПЗС автоколлимационный микрометр вакуумного коллиматора. Система программного управления (СПУ) АМК реализована на базе двух компьютеров: основного (iP-MMX), который установлен в служебном помещении сектора АМК и управляющего (5x86), находящегося на удалении около 240 м в отдельном вагоне-кабине рядом с павильоном телескопа АМК (рис.5.2). Оба компьютера взаимодействуют в процессе наблюдений по кабельной локальной сети, которая была создана и используется с 1995г.



Рис.5.2. Общий вид вагона-кабины с управляющим компьютером, главного павильона Николаевского АМК в раскрытом состоянии, трубы вакуумного коллиматора и дополнительного павильона для автоколлимационного ПЗС микрометра.



Рис 5.2. Общий вид центральной части главного павильона АМК.

СПУ используется для управления всеми устройствами телескопа (окулярный ПЗС звездный микрометр, ПЗС микрометр коллиматора, система отсчета круга и наведения телескопа, устройства точного времени, система сбора метеоданных), проведения инструментальных исследований и определения параметров телескопа, подготовки к наблюдениям, выполнения автоматических (по программе) наблюдений небесных объектов в различных режимах, для первичной обработки данных, отображения и сохранения полученных данных. Программное обеспечение СПУ на управляющем

компьютере разработано на языках Паскаль и Ассемблер в операционной системе MS-DOS в виде многооконной графической интегрированной среды наблюдателя, которая предусматривает: определение параметров телескопа и тестирование его узлов; автоматическое выполнение наблюдений при различных режимах работы регистрирующих устройств и по различным наблюдательным программам; первичную обработку и сжатие получаемой информации; графическое отображение поступающей с регистрирующих устройств информации; возможность гибкой настройки до и во время проведения наблюдений; передачу полученной информации на основной компьютер. СПУ установленная на основном компьютере отвечает за: автоматическую подготовку данных для последующих наблюдений с учетом ночных условий наблюдений и накопленного материала при использовании различных входных каталогов; автоматическую первичную обработку данных наблюдений после ее получения от СПУ управляющего компьютера и включающую: цифровую фильтрацию ПЗС изображений, отождествление всех наблюденных объектов и определение их координат в системе координат ПЗС звездного микрометра, определение координат коллимационных меток и отсчетов лимба в системе координат регистрирующих устройств; накопление информации для последующей полной

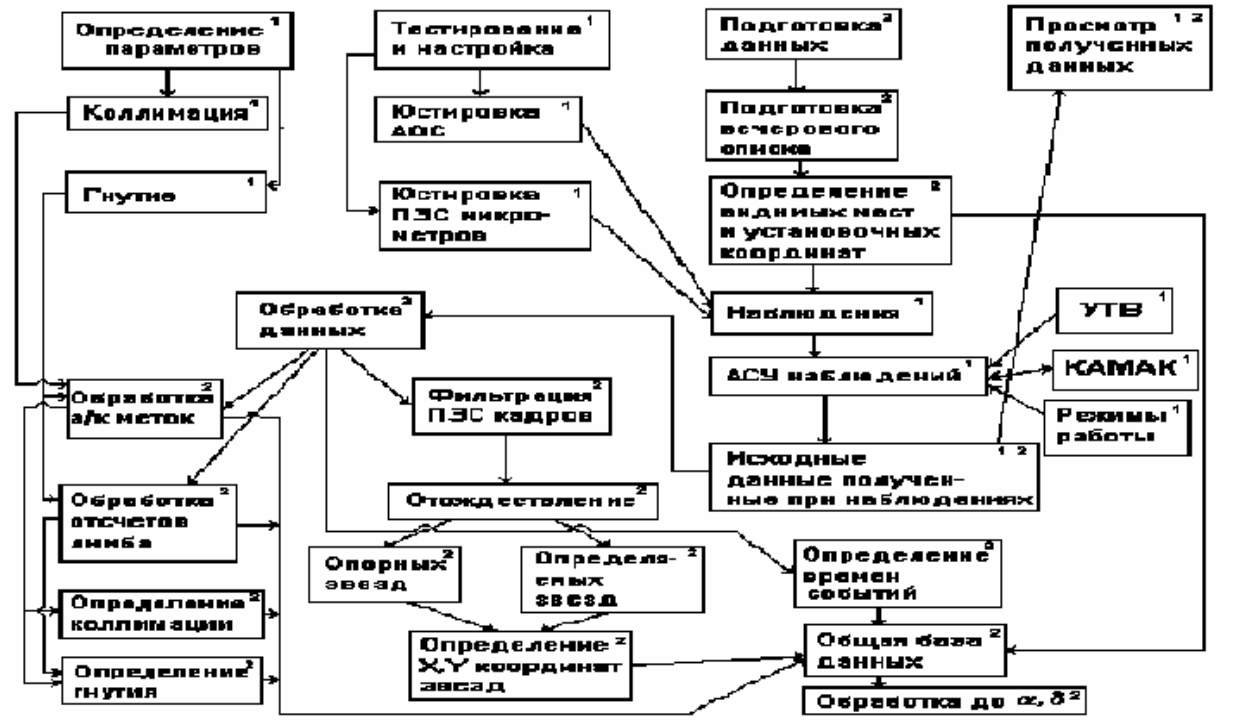

Рис.5.3. Программные средства АМК.

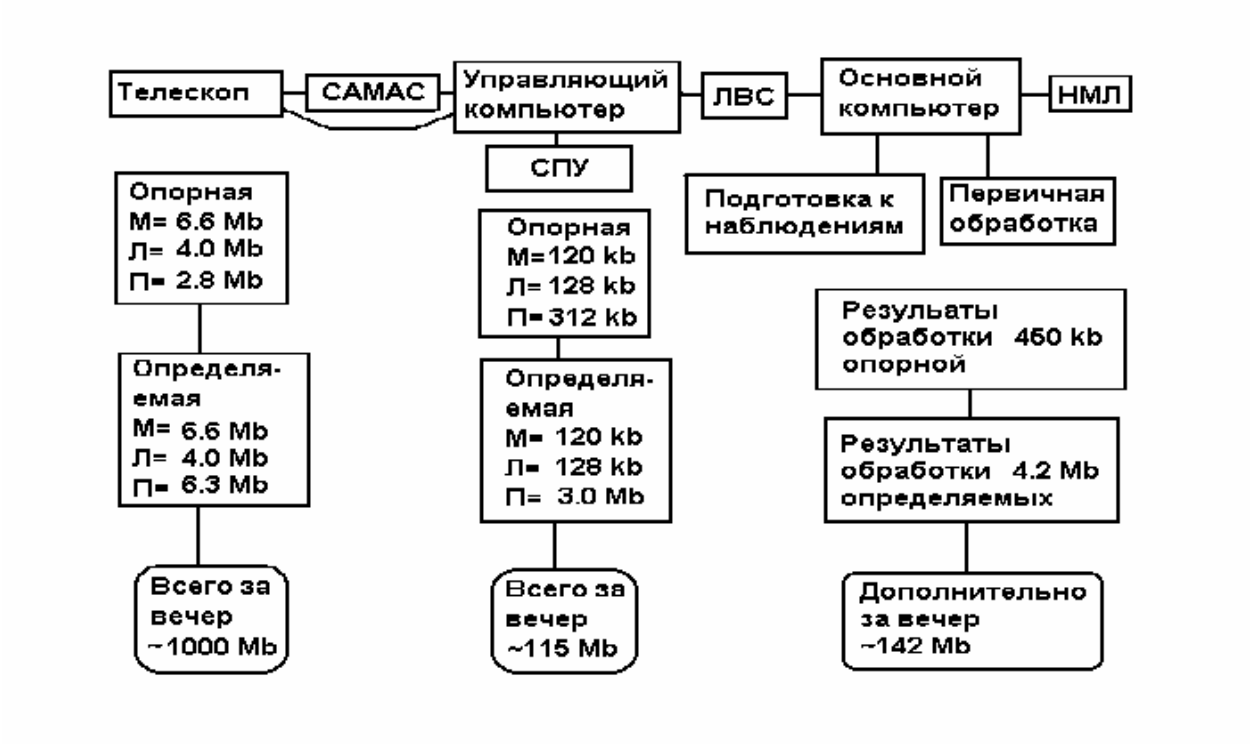

Рис.5.4. Структура информационных потоков СПУ АМК.

обработки; накопление статистической информации для использования при подготовке к наблюдениям, а также ее хранение. Схема взаимодействия СПУ управляющего и основного компьютера представлена на рис.5.3, где цифры 1 и 2 в правом верхнем углу блоков указывают на размещение конкретных функций соответственно на управляющем и основном компьютере. На рис.5.4 представлена более обобщенная схема всего аппаратно-программного комплекса с указанием размеров получаемой и обрабатываемой информации, где М - отсчеты микрометра длиннофокусного коллиматора, Л - отсчеты круга и П - отсчеты звездного микрометра для режимов наблюдений опорных и определяемых звезд.

Внедрение автоматизации АМК на базе представленного СПУ позволило: сократить количество наблюдателей, существенно увеличить производительность наблюдений, более эффективно распределять наблюдательное время; получать статистически однородный наблюдательный материал не связанный с конкретным наблюдателем; автоматически изменять режимы работы узлов телескопа в зависимости от условий наблюдений. Разработанная схема СПУ достаточно оптимальна для наблюдателей, поскольку базируется на практическом опыте эксплуатации всего аппаратно-программного комплекса АМК в процессе пробных и регулярных наблюдений в 1995-1998 гг. Аппаратные средства АМК разработаны на основе средств КАМАК с использованием как типовых, так и оригинальных модулей. Этот подход оказался оптимальным, поскольку позволил существенно сократить сроки и стоимость разработки, а также упростить обслуживание и модернизацию аппаратуры.

АМК установлен на соответствующих фундаментах в двух павильонах: главном с раздвижными частями и дополнительном для микрометра

автоколлиматора (рис.5.2). Наблюдатель и устройства СПУ находятся в рядом расположенном вагоне-кабине. Главный павильон АМК содержит столб-фундамент телескопа, подпорную стенку с полами, рельсовый путь и откатную часть павильона. Цокольной частью столба-фундамента является бутобетонная подушка, выложенная в форме креста. На подушке поверх слоев битумно-рубероидной гидроизоляции из силикатного кирпича на глиняно-цементном растворе выложен сам столб-фундамент. Он сужается так к верху, что на уровне пола горизонтальное сечение столба представляет собой прямоугольник размером 4,6 м на 1 м и ориентированный длинной стороной параллельно плоскости первого вертикала. На вершине столба с помощью анкерных болтов укреплены упоминавшиеся закладные фундаментные плиты, на которых располагаются все узлы телескопа. Вокруг столба выстроена подпорная стенка. Ее основанием является крестообразный ленточный фундамент. На высоте 1,6 м в стенку заделаны балки полового перекрытия, а вдоль ее длинных сторон закреплены рельсы, несущие откатную часть павильона. По наружному периметру, на всей высоте стенка защищена битумно-рубероидной гидроизоляцией и обложена утрамбованной глиной. Гидроизоляция и глиняный затвор надежно защищают столбы и подвальное пространство от почвенных вод.

Условия эксплуатации АМК: температурный диапазон $\pm 35^0$C; максимальный температурный градиент 3^0C/час; максимальная относительная влажность 95%; воздействие атмосферных явлений в рабочем состоянии: пыль, ветер, иней; работа в различных климатических зонах: высокие и средние широты, высокогорье (до 3000 м).

5.3. Методы исследований и наблюдений.

Методика исследования АМК и определения с его помощью положений небесных объектов была разработана на основе классической теории меридианного инструмента, с учетом конструктивных и принципиальных особенностей Николаевского АМК. Ниже приведены формулы прикладной теории АМК с учетом его горизонтальной конструкции для определения:

a) прямых восхождений:

$$\alpha = t + u + (R_\alpha Y_0)\sec(\delta) + ((y_1 - y_3) R_{ky} \sin(\psi - \delta) - (x_1 - x_3) R_{kx} \cos(\psi - \delta)) \sec(\delta) + a \sin(Z) \sec(\delta) + i \cos(Z) \sec(\delta) + 2c \sec(\delta) \quad (5.1)$$

где: α - прямые восхождения звезд, t - момент прохождения изображением звезды инструментальной меридианной плоскости, u - поправка часов, R_α - масштаб микрометра телескопа по прямому восхождению, Y_0 - соответствующая координата нуль пункта микрометра коллиматора в фокальной плоскости телескопа, δ - склонение звезды, x_1, y_1 - координаты нуль пункта микрометра коллиматора в плоскости микрометра коллиматора, x_3, y_3 - координаты автоколлимационного изображения нуль пункта микрометра коллиматора в плоскости микрометра коллиматора, R_{ky}, R_{kx} - масштабы микрометра автоколлиматора по соответствующим координатам, ψ - угол, на который ось 0У микрометра коллиматора отстоит от небесного экватора, a,i,c - азимут, наклонность и коллимация.

b) склонений:

$$\delta = M_e + M_к + R_\delta X_0 + (y_1-y_3) R_{ky} \cos(\psi-\delta) - (x_1-x_3) R_{kx} \sin(\psi-\delta) + \rho \qquad (5.2)$$

где: M_e - точка экватора на лимбе, $M_к$ - отсчет разделенного круга, R_δ - масштаб микрометра телескопа по склонению, X_0 - соответствующая координата нуль пункта микрометра коллиматора в фокальной плоскости телескопа, ρ - астрономическая рефракция.

Формулы (5.1) и (5.2) отображают следующие особенности АМК:

1. Труба телескопа вместе со звездным микрометром не требует точного знания своего положения. Это обстоятельство снимает ограничения на габаритные размеры трубы и позволяет увеличивать как диаметр объектива, так и его фокусное расстояние.
2. В качестве горизонтальной оси АМК является неподвижный коллиматор, более устойчивый по сравнению с вращающейся в лагерах горизонтальной осью классических инструментов.
3. Инструментальная система координат, в которой проводятся измерения прямых восхождений задается двумя векторами, которые задают плоскость визирования. Эти два вектора являются, соответственно, перпендикулярами к торцевой и диагональной грани призмы оптического узла АМК. Основным параметром, который характеризует эту систему координат есть угол $C = 45° + c$.
4. Ориентирование инструментальной системы координат относительно горизонтальной, выполняется также как и в классической теории с помощью двух элементів ориентирования - азимута колиматора и наклона колиматора.
5. Инструментальная система координат, в которой проводятся измерения склонений, базируется на стабильности отсчета плоскости визирования на круге АМК.

6.4. Результаты исследований и наблюдений.

По результатам проведенных инструментальных исследований и наблюдений получены основные данные, характеризующие качество и возможности АМК как астрономического телескопа нового типа для высокоточных определений угловых координат небесных объектов в качестве современного инструментально-измерительного комплекса с программным управлением (табл.2.1 в главе 2): средняя квадратичная ошибка отсчета круга и микрометров трубы и коллиматора (по автоколлимационным маркам) не более 0."02; предельная регистрируемая звездная величина - 14^m (с малоформатной матрицей ФППЗ-13М) и 16^m (с крупноформатной матрицей ISD 017). Исследования АМК показали, что горизонтальное гнутие незначительно и составляет 0."037 ± 0."042, коллимация АМК стабильна со временем и с температурой и ее зависимость от изменения температуры может быть описана выражением $C=Co + A \times t$, где Co= 12."705, A=0."026±0."008. Оценки систематических ошибок АМК, выполненные по опорным звездам из высокоточного каталога Гиппаркос показали существенно низкий уровень, порядка 0."02 - 0."03. Стабильность инструментальной системы АМК в течение трех лет наблюдений была высокой - уклонения отдельных значений системы инструмента от среднего не превышали 0.″02 (рис.5.5 и 5.6).

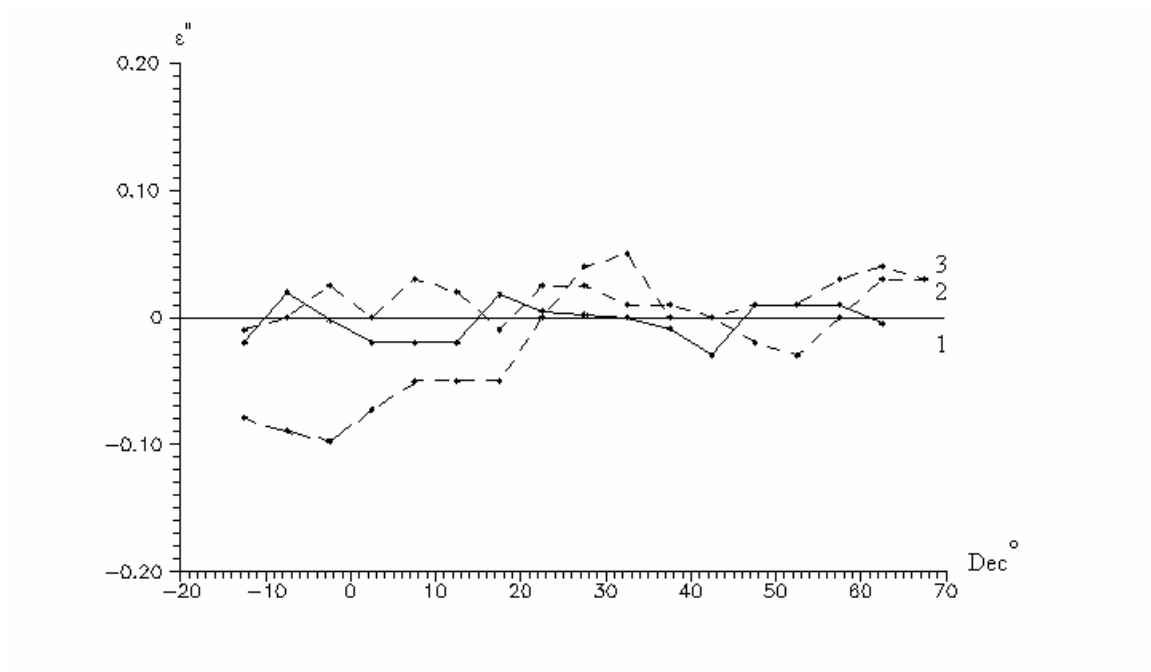

Рис.5.5. Сравнение средних систематических разностей вида $(O-C)_{\alpha}Cos\delta$ в смысле (Cat-HC) для АМК (1), САМС (2) и FASTT (3).

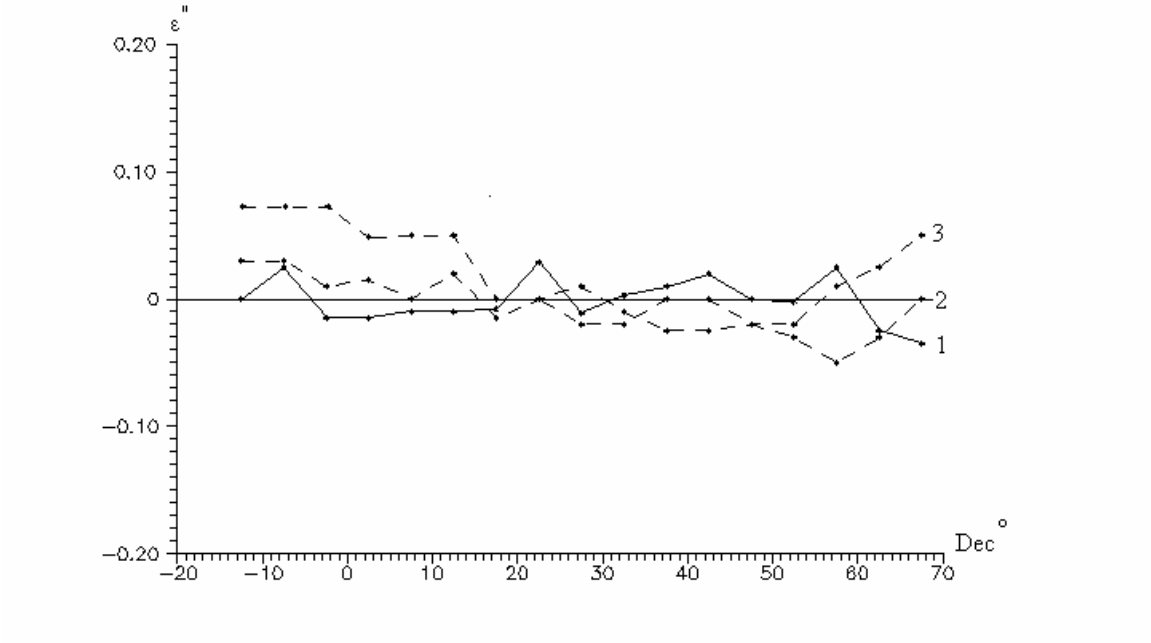

Рис.5.6. Сравнение средних систематических разностей вида $(O-C)_{\delta}$ в смысле (Cat-HC) для АМК (1), САМС (2) и FASTT (3).

С января 1996 года по декабрь 1998 года на АМК проводились регулярные наблюдения звезд 12-14.5 величин, распределенных вокруг 190 внегалактических радиоисточников для создания каталога положений,

включающего около 15 тысяч звезд в зоне склонений –15 - $+70^0$ из списка USNO-A2.0 и дополнительные звезды из каталога Tycho (TC). Первая версия каталога АМС была получена в 2000 году и включает положения около 14000 звезд со средней точностью по обоим координатам, соответственно:

$\varepsilon_\alpha \cos\delta = \pm 0''.07\ (\sec Z)^{0.20}\ (m-m_0)^{0.43}$;

$\varepsilon_\delta = \pm 0''.09\ (\sec Z)^{0.10} (m-m_0)^{0.31}$,

где m – звездная величина наблюдаемого объекта (от 8^m до 15^m), $m_0 = 7^m$ (константа).

Среднее количество наблюдений каждой звезды в каталоге около 2.5.

Сравнение характеристик АМК с показателями для действующих отечественных и зарубежных аналогов приведено в табл. 2.1 (глава 2) и показывает, в основном, подобный с ними уровень по техническим данным контрольно-измерительных устройств и более лучшие показатели по параметрам весовых и термических деформаций телескопа (гнутие, коллимация), определяющих результирующую точность определения координат небесных объектов, а в конечном итоге - эффективность АМК.

В заключение можно отметить, что

1) за период с 1980 по 1998 год в НАО был создан современный телескоп-робот (АМК), обладающий уникальными свойствами своей конструкции и характеристиками, не уступающими лучшим зарубежным меридианным телескопам, а по некоторым показателям (весовые и термические деформации) и превосходящими их. Точностные характеристики АМК (ошибки системы инструмента не превышают 0.″02-0.″03), соответствуют современным требованиям для наземной позиционной астрономии;
2) трехлетние регулярные наблюдения на АМК показали его безотказность и надежность (трудноустранимые неисправности и отказы отсутствовали), быстродействие (возможность наблюдений до 7000 объектов в час с крупноформатной матрицей и около2500 в час - с малоформатной), а в целом, высокую эффективность и широкие возможности для участия в современных астрономических программах. Учитывая уникальные свойства АМК в 1998 году он был соответствующим указом правительства Украины включен в перечень научно-технических объектов, представляющих национальное достояние государства.

5.5. Программа наблюдений на АМК.

Основные пункты планируемой с 2001 г. программы наблюдений на АМК включают:

1) непосредственные наблюдения внегалактических радиоисточников для определения связи между оптической и радио системами координат с точностью до ±5 mas;
2) определения положений звезд непосредственно в системе координат ICRF с целью поддержки и уплотнения каталога HC;
3) создание избранных, калибровочных площадок с опорными звездами от 10 до 17 звездных величин, распределенных по экватору для

обеспечения программ цифровых обзоров неба, типа SLOAN Digital Sky Survey (SDSS);

4) наблюдения астероидов и малых планет, в том числе по программе астероидной опасности.

Г Л А В А 6

ТЕЛЕСКОП - АСТРОГРАФ НА ПАРАЛЛАКТИЧЕСКОЙ МОНТИРОВКЕ

6.1. Особенности наблюдений на астрографе с ПЗС регистрацией.

Помимо автоматических меридианных телескопов в решении различных задач современной астрометрии участвуют большое количество широкоугольных астрографов (распространенный диаметр оптики 1-3 метров), а также некоторые большие телескопы с малыми полями (табл.6.1). Для ознакомления с базовыми вопросами фотографической астрометрии - геометрия соотношений между сферическими и прямоугольными системами координат, методики измерений и редукции астрономических изображений, вопросы технического использования астрографа посредством фотографической регистрации (на протяжении около 150 лет) предлагаются известные публикации (Подобед и Нестеров, 1982; Ризванов, 1991). В данной главе отметим некоторые особенности становления ПЗС астрометрии путем использования полупроводниковых панорамных приемников излучения в последние 15-20 лет как на существующих астрографах, так и телескопах новых конструкций.

Широкое внедрение ПЗС приемников, наряду с сохранением положительных свойств астрофотографии вносит дополнительные эффективные преимущества: наблюдения более слабых объектов (высокий квантовый выход) в разных режимах (сканирование, накопление, комбинированный метод), широкий динамический диапазон, цифровое представление материала наблюдений, что позволяет использовать различные методы обработки данных и повышает в конечном итоге точность (до 1-2 процентов пиксела); сняты проблемы обработки, хранения и измерения фотопластинок, в частности отпала необходимость в наличии координатно-измерительных машин и пр. ПЗС астрографы, работающие в угловых полях до $2° \times 2°$ демонстрируют широкие возможности: число объектов яркостью до 21-23 звездных величин достигает в некоторых программах 100 миллионов, ожидаемая точность положений звезд, около 20-30 mas. Задачи - определение астрометрических параметров небесных объектов (положения, собственные движения, параллаксы), исследование тел Солнечной системы. Особенно эффективно использование больших (диаметр оптики до 8-10 метров) наземных телескопов для наблюдений слабых объектов Солнечной системы с астрометрической точностью - объекты пояса Койпера, транснептунные обьекты, малые планеты, спутники больших планет и пр.

Однако, появились и специфические проблемы этого метода. Одна из них - малое поле ПЗС астрографа, поскольку размер матрицы, изготовленной из единого кремниевого кристалла не превосходит площади почтовой марки средних размеров 3x6 см. Хотя с другой стороны малое поле лишено существенного влияния аберраций, характерных для больших полей. Проблема может быть решена либо аппаратным путем (использованием мозаики ПЗС

матриц), либо методически (применением режимов сканирования). При этом увеличивается объем и стоимость оборудования как светоприемной части, так и вычислительных ресурсов. Высокие требования к стабильности расположения матрицы или их мозаики со временем и температурой, к надежности контроля ориентировки элементов (строк или столбцов) матрицы. Значительно возросла необходимость наличия высокоточных опорных каталогов положений и фотометрии звезд при использовании дифференциального метода как основного при получении определяемых данных. По крайней мере 200 опорных звезд на 1 квадратный градус на уровне точности не хуже 10 mas необходимо обеспечить при создании современных цифровых обзоров неба с высокой точностью. Имеющиеся каталоги (HC, TC, GSC, USNO-A2 и др.) пока не могут обеспечить одновременно требуемую точность и плотность по всей небесной сфере (около 8 млн. звезд). Однако, в перспективе, современные астрометрические программы должны решить или существенно снизить эту проблему (см. табл.6.1).

Табл.6.1. Избранные ПЗС телескопы-астрографы, участвующие в решении современных астрометрических задач.

Телескоп (Dm, Fm)	**Место установки**	**Метод регистрации**	**Диапазон зв.величи, спектр**	**Астрометр. Программы**	**Зона склонений (град.)**	**Число объектов (млн)**	**Точность положений (mas)**	**Состояние**
SLOAN telescope (D 2.5m)	Apache Point observatory, USA	мозаика 22 ПЗС 2048x 400, [2°.3]	10÷23 U, B, V, R, J	SDSS - положе-ния, фотомет-рия	СГЗ (Север. Галакт. Зона), 10^4 (π)	100	30	наблюдения с 1998г.
Астрометр рефлектор (D 61'')	USNO, Flagstaff USA	CCD	10÷21	положен., собств. движения	$-30^0 \div +90^0$	100	20	наблюдения с 1998г.
Астрометр рефлектор (D 0,9m)	CTIO, Чили	CCD	7÷16	UCAC (USNO CCD Astrograph Catalog)	$-90^0 \div +2^0$	40	20÷70	1997÷ 2003, первая версия UCAC 1, 27 млн. звезд, $-90^0 \div -6^0$ 2000г.
UCA телескоп (D0.2, F 2m)	USNO, USA	4096 x 4096 [9 мкм] [61′×61′]	9 –14					
VST (D 2.65m) (Италия)	ESO, Cerro Paranal, Чили	мозаика 32 ПЗС 16kx 16k [15мкм] [1°,5]	до 25 U, B, V, R, J	положен., фотомет-рия	южная зона		20-30	ввод в действие с 2001г.
SUBARU (D8.3, F15m)	Mauna Kea, Гавайи, USA	мозаика 10 ПЗС 2048x 4096, [15мкм] 0''2/pix	до 26,6 (V) U, B, V, R, J	глубокий обзор, дв.звезды, астероиды с 40 а.е. и далее			10	начало наблюдений с 2000г.

6.2. Описание телескопов SLOAN, VST и АЗТ-22.

6.2.1. SLOAN (APO, США).

В настоящее время телескоп SLOAN, установленный в Apache Point Observatory - APO (США) является наиболее примечательным астрографом нашего времени (рис.6.1, 6.2). Он создавался в течение 10 лет на средства филантропического фонда Альфреда Слоуна (Alfred P. Sloan), именем которого он назван. Первые наблюдения были начаты 9-10 мая 1998 года (“первый свет”), выход на регулярные наблюдения при полном оснащении телескопа в 2000г. Оптическая схема телескопа (Кассегрен) с диаметром первичного зеркала 2.5 метра имеет в фокальной плоскости поле зрения размером 9 квадратных градусов. Механическая конструкция телескопа имеет ребристую прямоугольную опору, несущую первичное и вторичное зеркала, регистрирующие устройства. Телескоп не имеет привычной башни, а между наблюдениями, будучи в горизонтальном положении закрыт откатным павильоном (рис.6.1).

Телескоп SLOAN оснащен ПЗС камерой, включающей мозаику из 52 матриц, которые регистрируют объекты до 23^m с площадки небесной сферы размером $2.^0 3$ x $2.^0 3$. Часть ПЗС матриц - 22, размером 2048x400 предназначены для определения положений наблюдаемых объектов в двух режимах: кадровом (stare mode) и сканирования либо суточным движением при неподвижной трубе (drift scan), либо телескоп сканирует своим движением небесную сферу по параллелям со скоростью, не равной суточному движению (driving scan). Ожидаемая точность определения положений дифференциальным методом при использовании опорных звезд из каталога ТС ±30mas. Остальные 30 фотометрических матриц (2048x2048) предназначены для наблюдений в 5-ти участках спектра с соответствующими фильтрами.

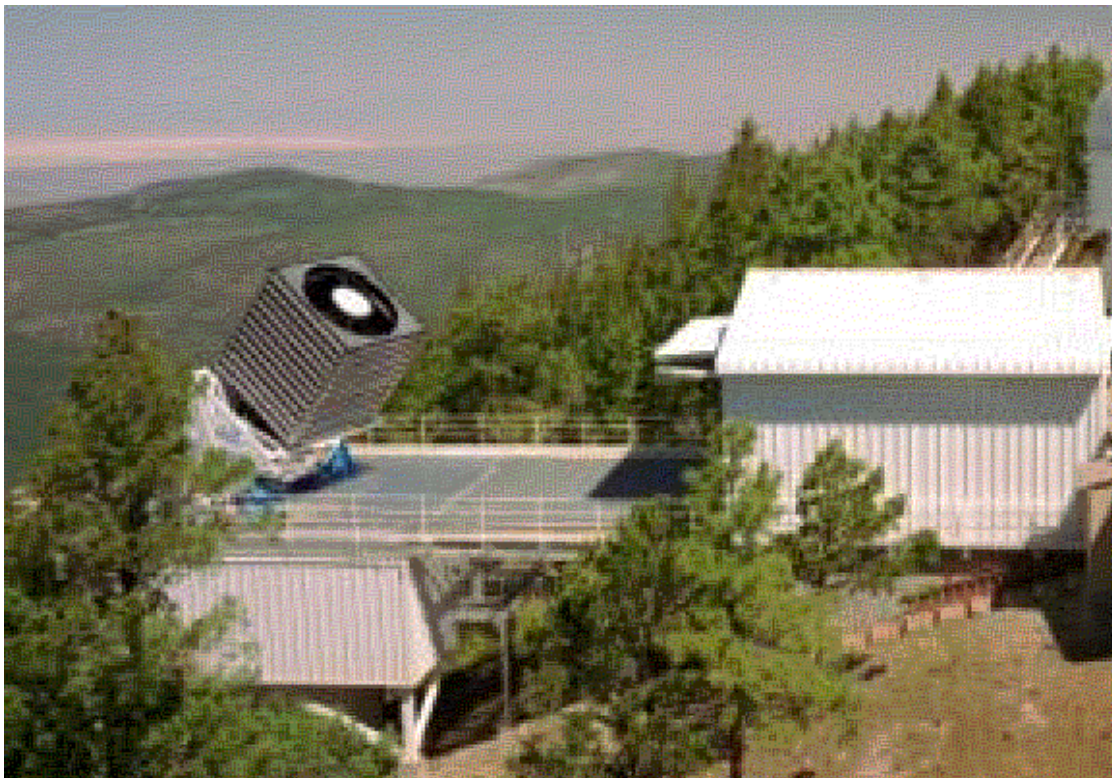

Рис.6.1. Общий вид телескопа SLOAN обсерватории в Апачах - APO (США).

Основной задачей телескопа SLOAN является создание цифрового обзора в северной галактической зоне, размером 0.25 небесной сферы, т.е. π (10000 квадратных градусов). Эта программа - Sloan Digital Sky Survey (SDSS) включает определение положений, звездных величин в пяти цветах, около 100 миллионов звезд, а также спектры около миллиона галактик и 100000 квазаров для построения трехмерной карты звездного неба.



Рис.6.2. Труба телескопа SLOAN.

6.2.2. VST (ESO, ЧИЛИ).

Если телескоп SLOAN исследует северную полусферу, то для южной полусферы изготавливается близкий по оптико-механической схеме телескоп - VLT Survey Telescope (VST). Телескоп VST создается на средства обсерватории ESO для обеспечения наблюдений на крупнейшем в мире наземном оптическом интерферометре VLT, расположенном в пустыне Паранал (Чили). Строительство VST начато в 1998 году, ввод в действие при полном оснащении телескопа ожидается в 2001г. Оптическая схема телескопа (кассегрен) с диаметром первичного зеркала 2.6 метра имеет в фокальной плоскости поле зрения размером 1°,5 x 1°,5. Механическая конструкция телескопа имеет альт-

азимутальную монтировку, что определяет высокую жесткость при обзоре всей полусферы; первичное и вторичное зеркала являются активными для корректировки изменения фокусного расстояния при наблюдениях в U, B, V, R, J участках спектра; температура телескопа в дневное время будет регулироваться кондиционированием под ночные условия и т.п. (рис.6.3).

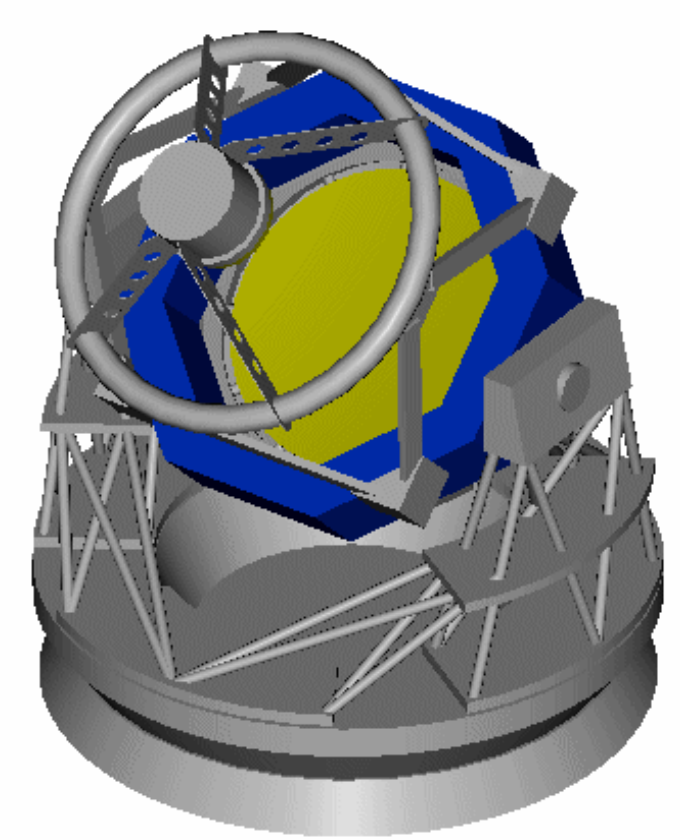

Рис.6.3. Общий вид телескопа VST обсерватории ESO (пустыня Паранал, Чили).

Телескоп VST оснащается 16Kx16K [15мкм] ПЗС камерой, включающей мозаику из 32 матриц, которые смогут регистрировать объекты до 25^m в площадках небесной сферы размером $1.^0 05$ x $1.^0 05$. Ожидаемая точность определения положений дифференциальным методом при использовании опорных звезд из каталога ТС ±(20 - 30) mas.

Основной задачей телескопа VST является создание цифрового обзора в южной части небесной сферы. В программу входят наблюдения удаленных объектов (квазаров, галактик и скоплений, микролинзирующих объектов и др.), ближайших галактик и объектов в Нашей галактике, включая планетоподобные объекты с целью определения положений, звездных величин в пяти цветах, а также спектры миллионов объектов для построения трехмерной карты звездного неба. Итогом этих работ должно быть обеспечение предварительными и входными данными наблюдений в малых полях на оптическом интерферометре VLT.

6.2.3. АЗТ-22 (Казанский университет, Турция).

Полуторометровый телескоп АЗТ-22 изготовлен на известном оптико-механическом предприятии ЛОМО в Санкт-Петербурге в 1995 году. К 1998 г. были выполнены работы по монтажу и установке телескопа на юге Турции (Бакирлитепе, вблизи Анталии) в соответствии с договором о сотрудничестве между КГУ (Казань), Институтом космических исследований (Москва) и Турецкой национальной обсерваторией (ри.6.4, 6.5). Оптическая схема широко известного в СНГ телескопа АЗТ-22 - менисковый Кассегрен. Механическая конструкция телескопа имеет параллактическую монтировку. В 1998 г. завершены работы по юстировке оптики приборному оснащению телескопа. Телескоп АЗТ-22 имеет набор оптических схем (F/3, F/8, F/16 для фокуса Кассегрена и F/48 для фокуса Кудэ). Кроме того, телескоп оснащен двумя гидами -телескопами системы Ричи-Кретьена с диаметром зеркал 36 см, которые в будущем могут быть использованы для параллельных наблюдений и дополнительной астрометрической и фотометрической привязки. Набор вторичных зеркал позволяет выбирать оптическую схему, исходя из целей астрономической программы. Наиболее оптимальной для задач астрометрии является система F/8, которая обеспечивает масштаб около 18" на 1 мм. Полное поле зрения телескопа в варианте Ричи-Кретьена при установке корректора составит 80 угловых минут (300 мм), однако в настоящее время оно ограничено геометрическими размерами ПЗС матриц (10-30 мм).

В 1999 году были выполнены первые наблюдения на АЗТ-22 В качестве приемника изображения использовалась ПЗС камера ST-8 (1530 x 1020, pixel size 9 mkm, Santa-Barbara, USA) формата 14 x 9 мм, что обеспечивало поле зрения 5 x 35 угловых минут.

Информация о "первом свете" была представлена казанскими астрономами И.Ф. Бикмаевым, Р.И. Гумеровым и Н.А. Сахибуллиным на конференции "Астрометрия, геодинамика и небесная механика на пороге XXI века", Санкт-Петербург, 19-23 июня 2000 года. Были показаны высококачественные изображения планет и их спутников, окрестностей внегалактических радиоисточников, изображений гравитационных линз, центральных зон компактных рассеянных скоплений, туманностей, участков на поверхности луны и др. Полученные данные продемонстрировали весьма высокую внутреннюю точность наблюдений (разность положений в пределах 10 mas по обеим координатам).

В дальнейшем планируется установить камеру с матрицей Loral 2048x2048 (USA). Матрицы такого типа при сенсибилизации по технологии, разработанной в Ликской обсерватории, могут достигать квантовой эффективности до 90%. Аппаратура управления матрицей и считывания сигнала предоставляет пользователю возможность изменять в широких пределах режимы управления ПЗС. Для определения положений наблюдаемых объектов предусмотрено использование ПЗС камеры в двух режимах: кадровом и дрейфовом сканировании. Ожидаемая точность определения положений дифференциальным методом при использовании опорных звезд из каталога, типа ТС, около ± (20-30) mas.

Задачей телескопа АЗТ-22 в астрофизической части являются: наблюдения удаленных объектов (квазаров, галактик и скоплений, микролинзирующих объектов и др.), ближайших галактик и объектов в Нашей галактике. Астрометрическая программа включает наблюдения звезд в

окрестностях внегалактических радиоисточников для уточнения связи между оптической и радио системами координат, наблюдения тел солнечной системы - избранные малые планеты и астероиды, включая транснептунные и объекты пояса Койпера с целью определения положений, звездных величин, масс, а также их спектры.

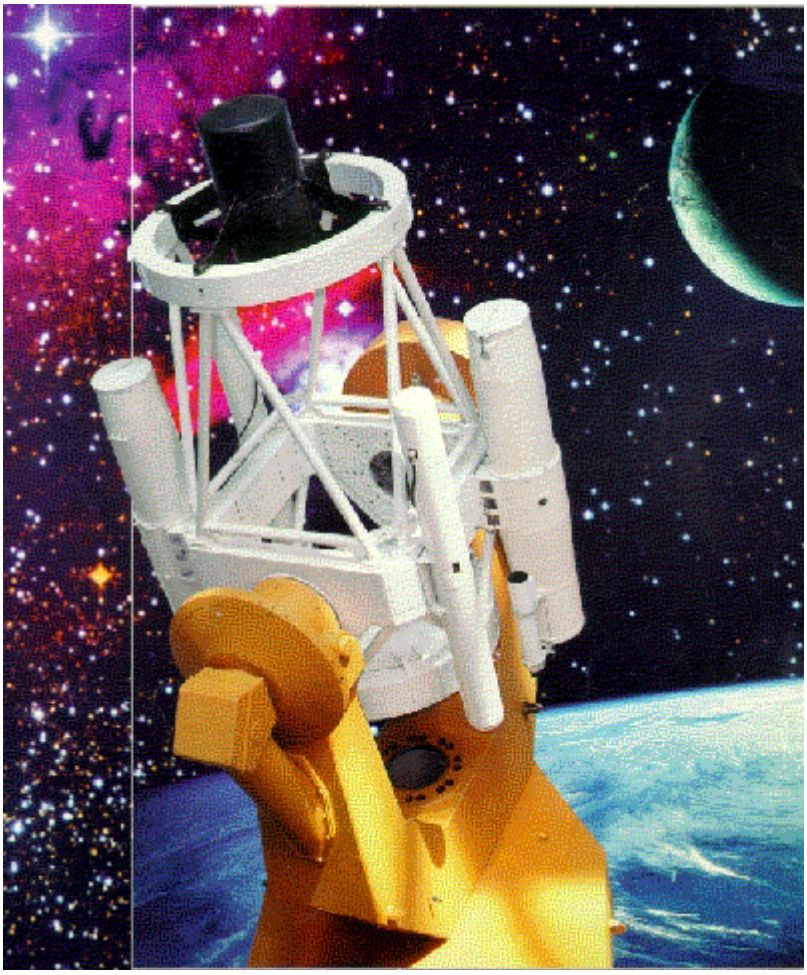

Рис.6.4. Общий вид телескопа АЗТ-22 Казанского госуниверситета.

6.3. Согласованные наблюдения на автоматических меридианных телескопах и астрографах.

Отметим один из методов, позволяющий значительно уменьшить негативное влияние малого поля ПЗС матрицы. Сочетание положительных качеств ПЗС астрографа, работающего в малых угловых полях с АМТ, регистрирующим небесные объекты на больших угловых расстояниях явилось основой для предложений по организации совместных наблюдений методом совмещенных полос. В основе метода лежит возможность проведения наблюдений на ПЗС астрографе в кадровом или сканирующем режимах таким образом, чтобы ПЗС кадры или полосы астрографа и ПЗС полосы (режим сканирования) АМТ перекрывались (совмещались) по площади (рис.6.6). При этом с помощью стабильной полосы АМТ, длительность которой должна быть достаточной для набора необходимого количества опорных звезд из

Hipparcos/Tycho каталогов или внегалактических радиоисточников можно учесть деформации полосы астрографа, а также обеспечить опорными объектами малые поля отдельных кадров астрографа.



Рис.6.5. Общий вид расположения астрографа АЗТ-22 КГУ в Бакирлитепе (Национальная астрономическая обсерватория, Турция).

Основное достоинство таких наблюдений заключается в возможности проведения наблюдений на ПЗС астрографе более слабых объектов с непосредственной связью с опорной системой ICRF. Внегалактические радиоисточники могут быть слабыми и наблюдены достаточно уверенно лишь посредством ПЗС астрографа. Одновременно в полосе АМТ регистрируется достаточное количество опорных звезд для определения положений радиоисточников в системе ICRF с точностью до 20 mas. В этом случае расчеты показывают что связь оптической и радио систем координат с точностью не хуже 5 mas по обеим координатам возможна при наличии, порядка 200 внегалактических радиоисточников.

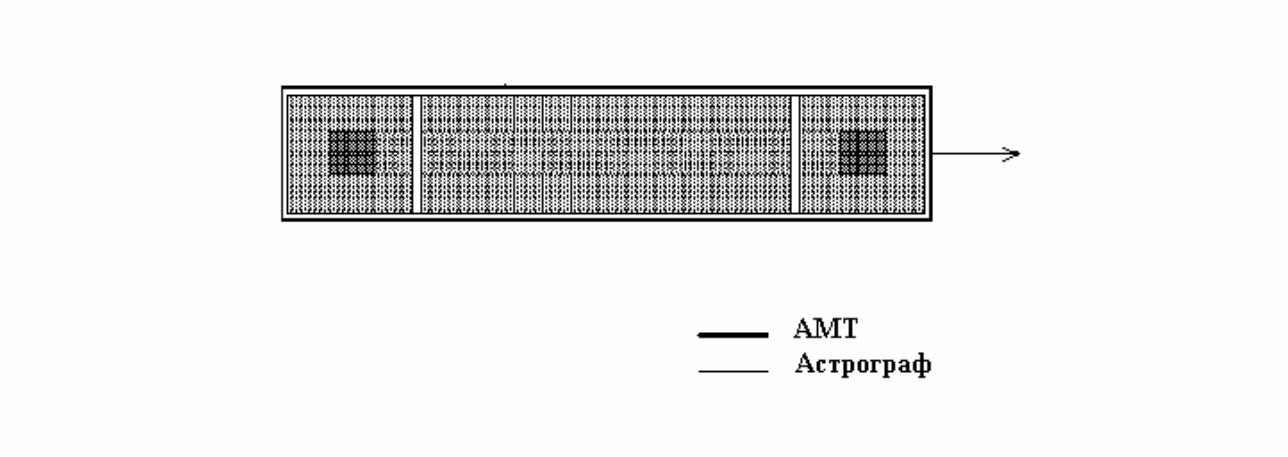

Рис.6.6. Варианты совместных наблюдений на АМТ и астрографе.

Достаточно эффективно работает метод совмещенных полос и при расширении системы координат НС на слабые звезды, при определении астрометрических параметров избранных объектов. В табл.6.2 приведена ожидаемая точность регистрации на АМТ и астрографах разного типа, оснащенных одинаковой матрицей при работе в кадровом режиме и дрейфовом сканировании.

Табл.6.2. Сравнительные характеристики АМТ и избранных ПЗС астрографов.

Телескоп	**АМТ**	**АЗТ-8**	**АЗТ-22**	
конструкция	**рефрактор**	**рефлектор**	**рефлектор**	
D (mm) F (mm)	180 2480	550 2500	1500 11600	1500 4519
кадровый режим (время интеграции $\tau \approx 600^s$) FOV mag: σ	 23′ x 26′ 11.0÷16.0÷17.5 0.″02÷0.″04÷0.″20	 23′ x 26′ 15.0÷20.0÷21.5 0.″02÷0.″04÷0.″20	 5′ x 6′ 14.5÷19.5÷21.0. 0.″005÷0.″01÷0.″05	 13′ x 14′ 15.0÷20.0÷21.5 0.″01÷0.″02÷0.″10
дрейфовое сканирование время интеграции τ mag: σ	 103^s 10.0÷14.0÷16.0 0.″02÷0.″04÷0.″20	 103^s 11.0÷16.0÷17.5 0.″02÷0.″04÷0.″20	 22^s 11.0÷16.0÷17.5. 0.″005÷0.″01÷0.″05	 57^s 14.0÷17.5÷19.0 0.″01÷0.″02÷0.″10

В таблице указаны: АМТ - аксиальный меридианный круг Николаевской астрономической обсерватории (Украина); АЗТ-8 Астрономической обсерватории Харьковского университета (Украина); АЗТ-22 Астрономической обсерватории В.П. Энгельгардта (АОЭ) Казанского университета (Россия).

6.4. Большие телескопы для астрометрии.

Несмотря на то, что главные задачи больших телескопов (диаметр оптики до 8-10 метров) лежат в области астрофизических исследований, тем не менее в области позиционных определений для наземной астрометрии малых

полей открываются уникальные возможности: поиск и исследование слабых спутников планет и новых объектов солнечной системы, новых планетных систем в окрестностях ближайших звезд, изучение орбит и масс двойных и кратных звездных систем и др. Особенно эффективно использование больших наземных телескопов для наблюдений слабых объектов Солнечной системы с астрометрической точностью - объекты пояса Койпера, малые планеты, транснептунные объекты, спутники больших планет и пр.

В табл.6.1 в качестве примера приведены некоторые данные для одного из крупнейших телескопов мира - телескопа SUBARU (Национальная астрономическая обсерватория Японии), установленного в обсерватории Mauna Kea (Гавайские острова) на высоте 4200 метров, в месте с наилучшими астроклиматическими условиями (рис.6.7, 6.8). Изготовление телескопа SUBARU было начато в 1991 году с использованием самых новейших технологий и в 2000 году был "первый свет". Оптическая схема телескопа менисковый кассегрен) с диаметром первичного зеркала 8.2 метра, толщиной 20 см и длиной первичного фокуса 15 метров имеет в первичном фокусе поле зрения размером 30′x30′, в кассегреновском фокусе - поле 6′x6′. Механическая конструкция телескопа имеет альт-азимутальную монтировку, что определяет высокую жесткость при обзоре всей полусферы. Качество и стабильность поверхности первичного зеркала обеспечивается 261 разгрузочными активаторами, управляемыми компьютером.

Телескоп SUBARU оснащен 2048x4096 [15мкм] ПЗС камерой, включающей мозаику из 10 матриц (эффективная площадь 15x12 см), которые смогут регистрировать объекты до 26.6^{m} (V) с площадки небесной сферы размером 30′x24′ в первичном фокусе и 5′x4′ в кассегреновском фокусе. Кроме активной оптики телескоп снабжен также узлом адаптивной оптики, что обеспечивает предельное дифракционное разрешение, на уровне космического телескопа Хаббла (HST).

Управление телескопом SUBARU обеспечивается наблюдателем в режиме удаленного доступа из любой обсерватории.

Задачей астрометрического направления телескопа SUBARU является "глубокий" поиск и тщательное изучение слабых объектов Солнечной системы слабее 20^{m} (астероиды, спутники Сатурна, Юпитера), включая планетоподобные объекты с целью определения их положений, звездных величин в пяти цветах, наблюдения двойных звезд и т.п. По некоторым оценкам, ожидаемая точность определения положений наблюдаемых объектов посредством SUBARU, около ± 10 mas.



Рис.6.7. Общий вид расположения телескопа SUBARU (обсерватории Mauna Kea, Гавайи, США).



Рис.6.8. Телескоп SUBARU.

6.5. Современные программы для ПЗС астрографов.

Развитие астрометрических исследований на телескопах, оснащенных ПЗС камерами становится все более активным.

В материалах комиссии N24 “Фотографическая астрометрия”, подготовленных для 24-го съезда Международного астрономического союза (МАС) в Манчестере, август 2000 г. (Англия), отмечались следующие программы:

- определениям тригонометрических параллаксов звезд до 21-й величины – морская обсерватория (USNO (США), обсерватория Siding Springs (1 м рефлектор) и др.;
- определение положений и собственных движений во Флагстаффе (1.3 м астрометрический рефлектор), на обсерваториях CTIO и KPNO (0.9 м, 4 м.), на 2.5 м рефлекторе (Апачи, США) и др.;
- исследования по определению связи между оптической (HC) и радио (ICRF) опорными системами координат (1.56 м телескоп Шанхайской обсерватории (КНР), АЗТ-22 Казанского университета в Турции, в обсерваториях CTIO и KPNO (0.9 м. телескопы) и др.);
- астрометрические наблюдения спутников на 1 и 2-х метровых телескопах обсерватории Pic du Midi (Франция), на 2.2 м телескопе ESO (Чили) и др.;
- наблюдения малых планет, астероидов, комет, в том числе по программе защиты Земли от астероидно-кометно-метеороидной опасности; в различных пунктах Земли участвуют несколько десятков телескопов, с диаметрами оптики до 4-6 метров, оснащенных ПЗС приемниками.

В табл.6.1 приведены данные для избранных, наиболее показательных ПЗС астрографов, участвующих в выполнении современных астрометрических программ. Особенно значительно выглядят программы “глубоких” цифровых обзоров неба типа SDSS, обещающие получение высокой точности для объектов слабее 20-й звездной величины и слабее, общим количеством до 200 миллионов по всей сфере в довольно короткие (3-5 лет) сроки!

На территории СНГ в астрометрических наблюдениях активно участвуют из наиболее крупных: 2-х метровый телескоп ГАО НАНУ (Терскол), АЗТ-22 ГАИШ Московского университета, АТ-64 КРАО (КРЫМ), АЗТ-8 Харьковского университета (Украина), в Пулковской обсерватории ведутся ПЗС наблюдения на 26 дюймовом рефракторе и др.

Таким образом, оценивая возможности и ограничения по точности рассмотренных в этой главе типов наземных астрометрических телескопов можно отметить, что они определяются, в основном техническими средствами, атмосферными условиями, методическими особенностями. В данном случае с учетом всех факторов оптимистическая оценка точности определения положений в малых угловых полях составляет около10 mas.

Г Л А В А 7

ОПТИЧЕСКИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ В АСТРОМЕТРИИ

Работы в области звездной интерферометрии по определению угловых размеров звезд, спутников планет и астероидов, угловых расстояний между компонентами двойных и кратных систем, создание различного типа интерферометров, работающих в оптическом и инфракрасном диапазонах подготовили основу для применения оптического интерферометра в позиционной астрономии с целью измерения положений небесных объектов повышенной точности. Первые разработки в этом направлении начались еще в 1970-х годах после появления радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ) с ожидаемой точностью миллисекундного уровня по обеим координатам. Однако, чтобы участвовать в массовых позиционных наблюдениях обширных списков звезд оптические интерферометры должны пройти длительный путь усовершенствования. Хотя, вне всякого сомнения - это инструмент 21-го столетия.

7.1. Методы оптической интерферометрии (интерферометр Майкельсона).

Известно, что разрешающая способность телескопа или интерферометра определяется в соответствии с формулой:

$$\Delta = 1.22 \times \lambda / D, \qquad (7.1)$$

где λ - длина волны наблюдаемого диапазона, D - диаметр входного отверстия телескопа, антенны или базы интерферометра.

При увеличении диаметра телескопа или базы интерферометра разрешающая способность может быть увеличена. При размерах апертуры наземного оптического телескопа около 1 метра и поле зрения около 0.5 градуса разрешение ограничивается в основном атмосферной турбуленцией на уровне 2-3 mas при времени регистрации в течении часа.

Исследования американских астрономов Шао и Колавиты (M.Shao & M.M.Clavita) ожидаемой точности определения положений объектов с помощью длиннобазисного оптического интерферометра наземного расположения в обсерваториях с отличным астроклиматом, типа Mauno Kea, Гавайи показывают, что можно достичь астрометрической точности около 10-30 микросекунд за время интеграции света около часа (см. рис. 7.1). Такое повышение точности на два порядка определяется следующими обстоятельствами: 1) учет атмосферных помех - величина базы должна быть достаточно велика (до 50 метров при λ=0.55 мкм) чтобы превышать расстояния между отдельными световыми лучами в турбулентной атмосфере; 2) смещения базы должны быть учтены с точностью не хуже 0.001 мкм; 3) использование опорных звезд в узких полях (около 20″) вокруг определяемых звезд, когда вызванные нестабильностью атмосферы угловые смещения обоих объектов сильно коррелированы.

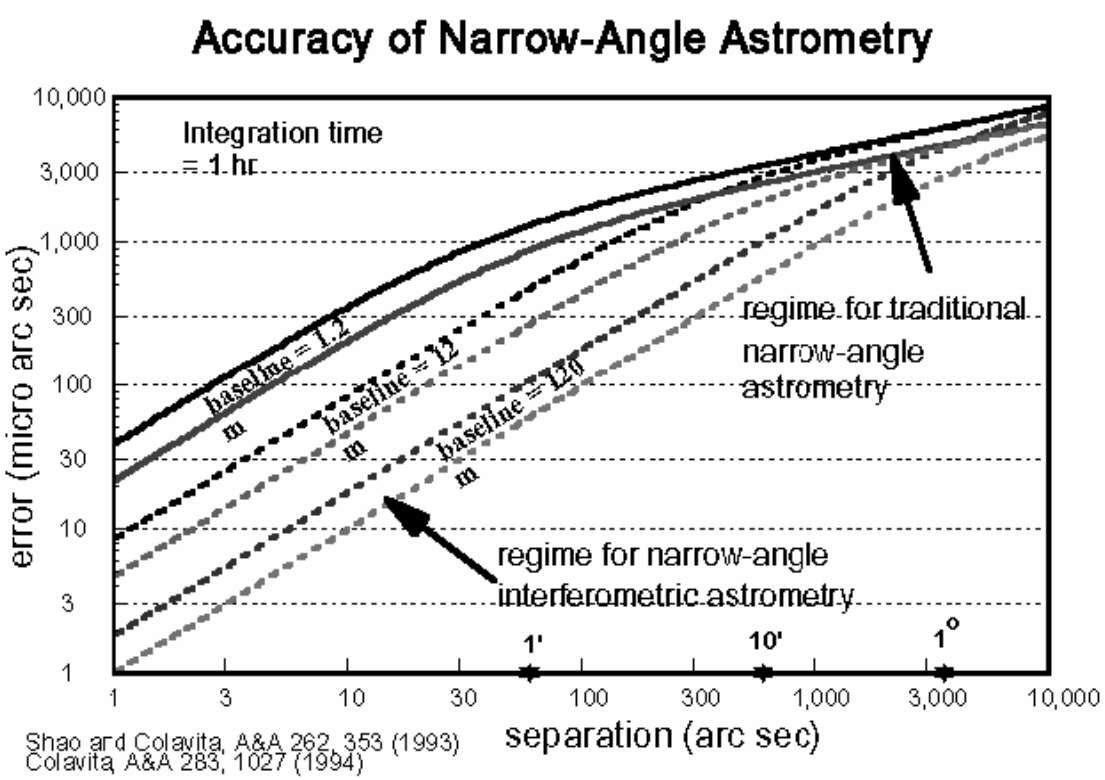

Рис. 7.1. Предельная угловая точность в наземной астрометрии малых полей при времени накопления 1 час.

В основе определения координат посредством оптической интерферометрии лежит явление интерференции (сложения) световых волн при условии их когерентности (т.е. согласованности по амплитуде и фазе). Этот принцип был реализован в простом двухэлементном интерферометре Майкельсона, основные идеи которого в различных модификациях присутствуют в современных наземных (и космических) проектах. Для получения координаты наблюдаемого объекта (звезды) оптический интерферометр должен измерять угол между направлением на звезду и вектором базы (см. рис. 7.2). Для получения второй координаты необходима другая база, различно ориентированная от первой.

Для определения угла между объектом и базой (или между двумя. звездами) используется соотношение между задержкой d (положение интерференционных колец) и положением источника световых волн (объектом):

$$d = \overline{B} \times \overline{S} + c, \qquad (7.2)$$

где B - единичный вектор базы интерферометра, соединяющей два сидеростата (зеркала 1 и 2) - (определяет величину базы, ее ориентировку); S - единичный вектор объекта (определяет координаты); c - нуль-пункт линии задержки, т.е. постоянная, определяющая величину инструментальной задержки (ошибки оптического канала, метрологической лазерной системы, измерительных устройств и пр.); определяется, в основном, посредством

опытных измерений; d - величина задержки, измеряемая по положению центральной полосы (полосы нулевого порядка) интерферограммы и положению линии задержки (ЛЗ).

В частности, для двухэлементного интерферометра с базой ориентированной обычно горизонтально по меридиану можно определить одну координату - склонение из формулы: $d = B \times \mathrm{Sin}Z + c$, или с другой базой в первом вертикале можно определить прямое восхождение. Интерферометр с двумя и более базами может определять обе координаты наблюдаемого объекта.

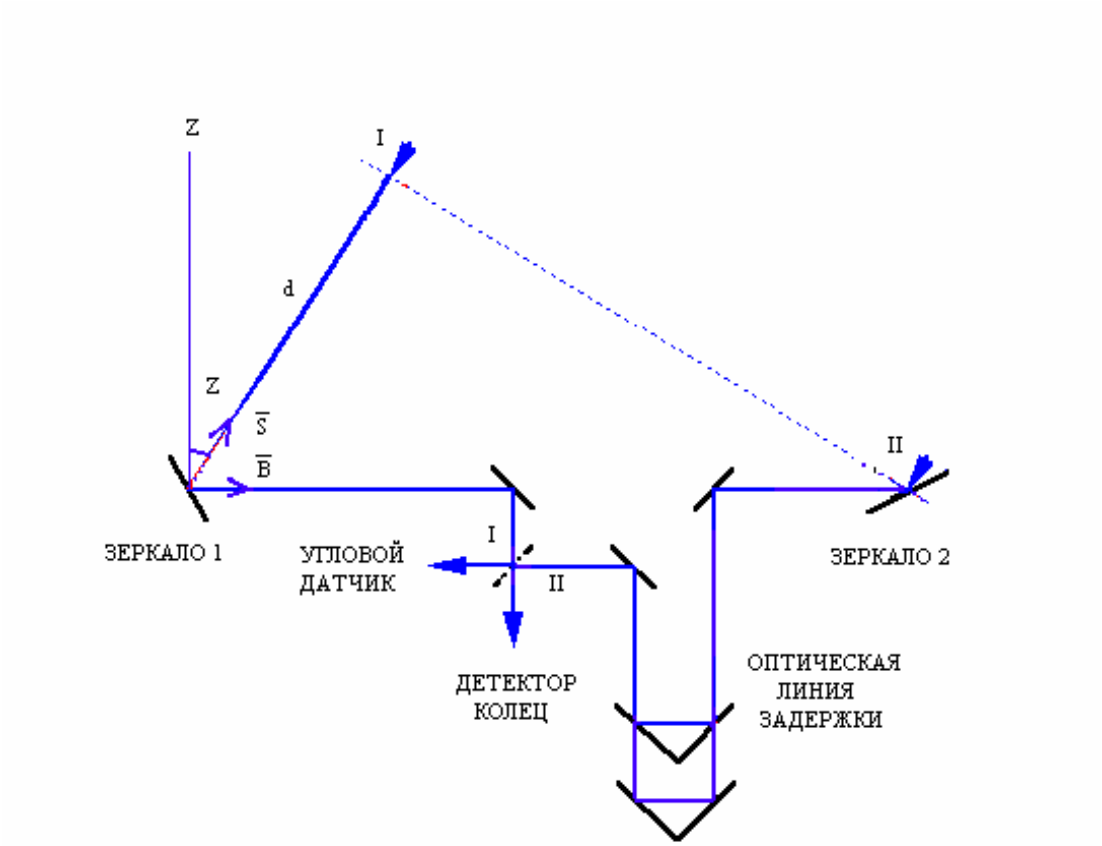

Рис.7.2. Общий принцип действия двухэлементного оптического интерферометра

Величина задержки d измеряется детектором колец по положению центральной полосы (полосы нулевого порядка) интерферограммы при равенстве хода лучей I и II от зеркал 1 и 2 до смесителя, что создается соответствующим положением зеркал оптической линии задержки (ЛЗ). Положение ЛЗ измеряется лазерным дальномером с точностью около 1 нанометра (для наземного интерферометра). База наземного интерферометра база жестко связана с Землей и участвует в ее суточном вращении. При наблюдении звезд с хорошо известными координатами можно исследовать поведение элементов базы.

В принципе, достаточное количество измерений геометрической задержки d позволяет определить в уравнении (7.2) неизвестные величины, связанные с базой и координатами наблюдаемого объекта. Однако, в действительности эта задача чрезвычайно осложнена влиянием атмосферы на

наблюдения, непостоянством базы и константы (c) с температурой и временем. Устранение и учет этих трех эффектов в зависимости от стабильности конструкции интерферометра, методики наблюдений и обработки данных определяет точность наземной интерферометрической астрометрии.

В состав интерферометра должны входить следующие необходимые составляющие элементы (см. рис.7.2): 1) зеркала 1 и 2 или телескопы-сидеростаты, посылающие лучи света I и II от объекта наблюдений на смеситель; 2) вакуумная оптическая линия задержки, выравнивающая ход лучей от зеркал сидеростатов до смесителя СМ с контролем положения ее вторичных отражателей; 3) лазерная метрологическая система для контроля изменения положений отдельных узлов интерферометра, включая ЛЗ, сидеростаты и пр.; 4) система получения интерферограммы и ее отслеживания во время наблюдения объекта, включая СМ, детектор колец; 5) система автоматического гидирования объекта, включающая угловой датчик и обеспечивающая параллельность волновых фронтов от зеркал сидеростатов в пределах долей угловой секунды для их интерференции.

Состав и параметры технического обеспечения конкретного интерферометра определяется поставленными задачами, этапом изготовления, уровнем новизны используемых комплектующих. Именно такое, сложное устройство, как оптический интерферометр является показателем развития внедрения научно-технического прогресса в астрономии.

7.2. Наземные интерферометры.

7.2.1. Звездный интерферометр MARKIII (Mt. Wilson Observatory-USNO, США).

Первым оптическим интерферометром для решения астрометрических задач был интерферометр MARK-III, созданный в Морской обсерватории США в 1979-92 гг. (табл.7.1). В его составе было три сидеростата с переменной базой 3-31 метров, лазерная метрологическая система, оптические линии задержки, необходимые оптико-механические и регистрирующий устройства. Астрометрические измерения, выполненные в 1988 году в течение 5-ти ночей показали возможность определения склонений звезд FK5 с точностью 6 mas, прямых восхождений 10 mas. Интерферометр имел при этом базу 12 метров. MARK-III послужил хорошей основой для дальнейших разработок более совершенных оптических разработок для целей астрометрии и астрофизики как для наземных наблюдений, так и для космических условий.

Табл.7.1. Интерферометрические комплексы для наземной оптической астрометрии.

Телескопы (D, F)	**Место установки**	**Число элементов, база (м)**	**Программа, зона склонений (град)**	**Яркость (mag), спектр**	**Точность положе-ний (mas)**	**Состояние**
MARK-III Interferometr (D 0.08m)	Mt. Wilson, USA	3,3-31м	astrometric, дв.звезды, $+15^0+55^0$	5	6-10, 2 (дв зв.)	1986-92

NPOI- I (D 0.5m) NPOI-II (D 0.5m)	USNO, Flagstaff, USA	4, 19÷38m 6, 2÷437m	astrometric, $-30^0 \div +90^0$ imaging, дв.звезды	до10 0.45÷0.85 мкм	1÷3 0.5	с 1998 г. в действии
PTI (D 0.5m)	M.Palomar, USA	3, 110m	imaging, astrometric			с 1995 г.
VLTI (D 8.2m)	ESO, Cerro Paranal, Чили	4, 130m 8, 8÷202m	imaging, micro-arc- second astrometry	18-20, 0,45÷ 1.2 мкм	1÷0,01	с 2003 г.
KIIA (D 10m)	Mauna Kea, Гавайи, USA	2, 85м 6, 165	imaging, тела солнечной системы	19-20, 1.5÷5 мкм	3÷0,03	с 1998 г.

7.2.2. Интерферометрический комплекс NPOI.

В начале 1990-х годов на основе MARK-III в USNO был создан более совершенный интерферометр NPOI (Navy Prototype Optical Interferometer). В составе единого комплекса NPOI имеются астрометрическая и астрофизическая части (рис 7.3). NPOI-I, предназначенный для решения астрометрических задач включает 4 сидеростата диаметром 0.5 метра (апертура 12 см - 35 см) и переменной базой 19-38 метров, вакуумные линии задержки (ЛЗ), лазерную метрологическую систему, необходимые оптико-механические и регистрирующие устройства. Интерферометр полностью автоматизирован. В 1996 году на NPOI-I были начаты наблюдения звезд до 10-й величины по программе создания системы координат по ярким звездам с миллисекундной точностью. На Коллоквиуме MACN180 (2000 г.) сообщалось о точности определения 1000 положений звезд посредством NPOI-I, порядка 1-3 mas по обеим координатам.

В состав NPOI-II, предназначенного для решения астрофизических задач (imaging) входят 6 сидеростатов диаметром 0.5 метра (апертура 12 см), расположенные по направлениям Y-образной базы протяженностью от 2-х до 437 метров и все остальные необходимые оптико-механические и регистрирующие устройства.

Интерферометр NPOI оснащен устройством быстрого гидирования., активной системой отслеживания интерферограмм в широкой полосе 0.45-0.85 мкм в 32 спектральных каналах для учета влияния атмосферы, лазерной метрологической системой, обеспечивающей контроль положений сидеростатов относительно основания с точностью 100 нм. Интерферометр полностью автоматизирован. Получена разрешающая способность инструмента при наблюдении двойных звезд на уровне 0.5 mas. В целом, наземный оптический интерферометр NPOI как один из самых больших длиннобазисных интерферометров при достаточно полном учете влияния атмосферы, метрологическом контроле базы и других инструментальных параметров обеспечивает высокоточные широкоугольные наблюдения.



Рис.7.3. Общий вид оптического интерферометра NPOI (Flagstaff, США) (Y-образная база NPOI-II просматривается в виде конструкций из вакуумных труб; справа, вверху – длинное помещение лаборатории для размещения ЛЗ и другой контрольно-измерительной аппаратуры NPOI-II; система сидеростатов NPOI-I просматривается в виде четырех светлых павильонов в центре).

7.3. Интерферометрическая связь больших наземных телескопов.

Развитие волоконно-оптических средств связи привело к созданию интерферометрических комплексов, включающих большие телескопы с диаметрами зеркал до 8 и более метров и базами до 200 метров (KIIA, VLTI и др.). Хотя главные задачи таких комплексов лежат в области астрофизических исследований (при формировании изображений наблюдаемых объектов), тем не менее в области позиционных определений для наземной астрометрии открываются уникальные возможности: поиск и исследование слабых спутников планет и новых объектов солнечной системы, новых планетных систем в окрестностях ближайших звезд, изучение отдельных звезд, двойных и кратных звездных систем и др.

8.3.1 Интерферометрический комплекс VLTI (ESO, Чили).

Комплекс интерферометра VLTI включает 4 телескопа с зеркалами 8.2 метра и базой 57÷130 метров (рис.7.4).

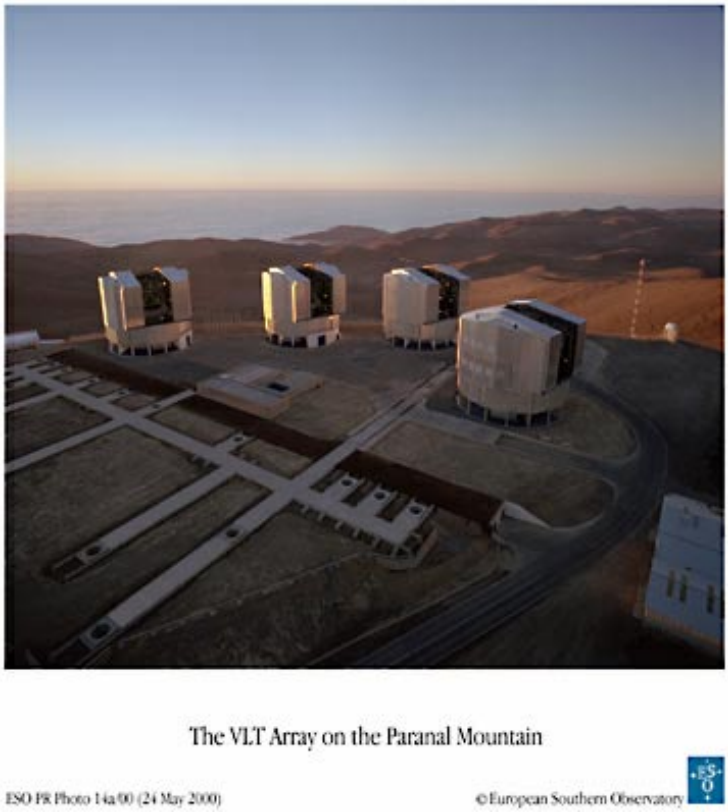

Рис.7.6. Общий вид интерферометра VLTI (ESO, Чили).

Предусмотрена возможность включения в состав комплекса еще двух (до восьми) вспомогательных телескопов диаметром 1.8 метра. На рисунке 7.5 показано расположение этих малых телескопов на специальных направляющих, по которым они могут изменять свое положение (отмечено черными точками). Помимо улучшения получаемого изображения наблюдаемого объекта, такая комбинация больших и малых телескопов увеличивает базу до 202 метров, при возможности использования до 328 базовых вариантов. Кроме того, это позволяет использовать VLTI комплекс в любое время даже без больших телескопов, сохраняя для более ярких объектов возможность получения наивысшего разрешения среди всех существующих и проектируемых интерферометров (табл.7.1).

Оптическая схема VLTI предусматривает сведение лучей света от всех телескопов с помощью отражающих зеркал, одно из которых выполнено активным (adaptive) в фокусе Кудэ (рис.7.5). В комплексе лабораторных помещений (ЛБ), расположенном рядом с вакуумным тоннелем оптических линий задержки (ЛЗ) размещены в фокусе Кудэ: оптические подсистемы (Кудэ и активная оптика, смесительный узел и пр.), контрольно-измерительные устройства, вычислительное и научное оборудование (спектрографы, приемники с широкими и узкими фильтрами и пр.).

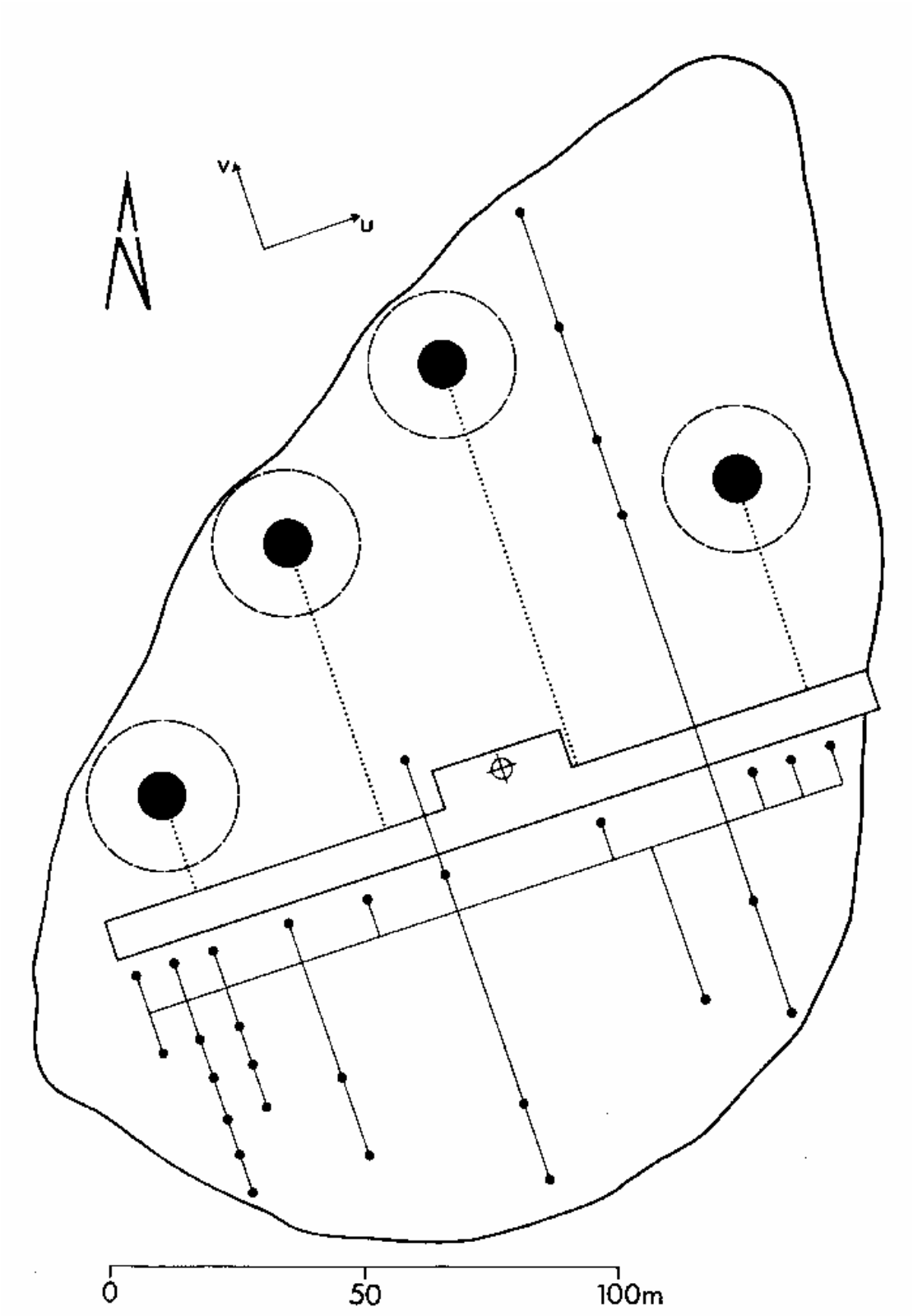

Рис.7.5. Схема расположения отдельных элементов вид интерферометра VLTI (ESO, Чили).

Точная измерительная система - PRIMA (Phase-Referenced Imaging and Microarcsecond Astrometry) позволяет наблюдать в поле зрения VLTI изображения интерференционных колец одновременно у двух звезд и измерять

дифференциальную задержку их оптических путей с высокой точностью, до ±5 нм. PRIMA состоит из пяти подсистем, входящих в комплекс VLTI звездный сепаратор (Star separator) в фокусе Кудэ, лазерная метрологическая система (Laser metrology system), дифференциальные линии задержки (Differential delay lines), блок измерения интерференционных колец (Fringe sensor unit), астрометрический детектор (Astrometry detector) (рис.7.6). При максимальной базе до 200 метров можно измерять относительные угловые положения звезд до 18^m с точностью до 10 μas, находящихся на угловых расстояниях до 10", при времени интерференции до 30 минут. Такая точность может быть достигнута на интерферометре благодаря малому влиянию атмосферной турбуленции в узких полях зрения и длинных базах при их высокой стабильности и точности измерений (рис.7.1).

Посредством дифференциальных измерений в узких полях при точности до 10 μas можно обнаружить планеты типа Юпитера на расстоянии до 240 парсек от центральной звезды, типа Урана до 44 парсек и планет, массой равной 10 масс Земли на расстоянии до 1.5 парсек от центральной звезды. При точности 50 μas аналогичные исследования с планетами типа Юпитера возможны на расстоянии до 48 парсек, Урана до 9 парсек. Точность VLTI вполне позволяет проводить исследование явлений гравитационного микролинзирования (точности около 100 μas уже достаточно для начальных результатов, проблема — в ограничении по точности слабых объектов), изучение и получение орбит спектрально-двойных звезд для определения масс обеих компонент и расстояния до них, измерение тригонометрических параллаксов с 10-процентными ошибками до расстояния 10 кpc и другие вопросы звездной, галактической и внегалактической астрометрии.

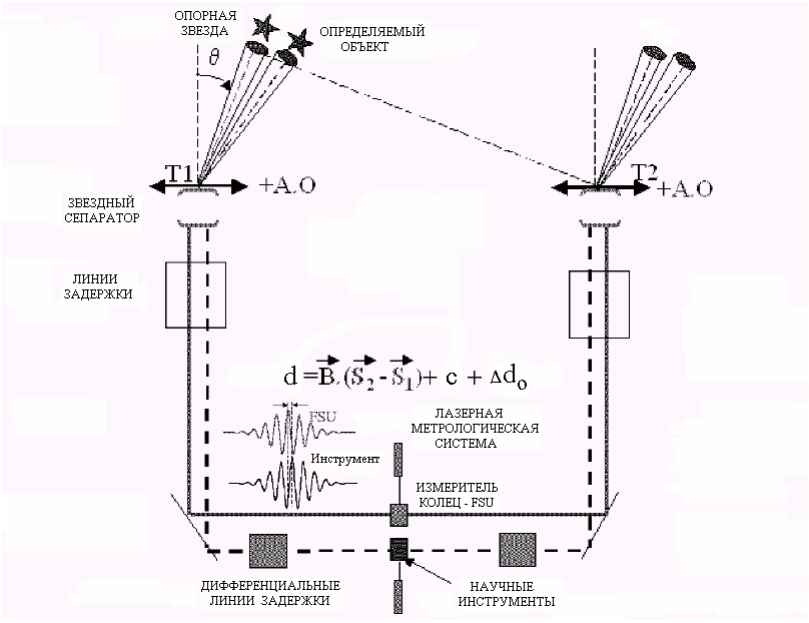

Рис.7.6. Принципиальная схема действия системы PRIMA.

7.3.2. Интерферометрический комплекс KIIA (Гавайи, США).

Расположенные на Гавайях (Mauna Kea) в одном из наиболее лучших по астроклимату мест на Земле два крупных телескопа Keck I и Keck II (10 м)

работают в режиме интерферометра Майкельсона с базой 85 метров, а в комбинации с четырьмя вспомогательными (D 1.8 м) телескопами образуют уникальный интерферометрический комплекс из шести телескопов с переменной базой от 30 м до 140 м. (Рис.7.7 и 7.8). В режиме изображений предусмотрена возможность использования от 9 до 15 вариантов баз с 4, 5, 6-ю телескопами, при этом угловое разрешение наблюдаемых точечных объектов до 19^m возможно на уровне, около 3 mas в диапазоне 1.5-5 мкм за время накопления 1000 секунд. На базе 85 м ожидаемое угловое разрешение около 5 mas для 2.2 мкм. В астрометрическом режиме высокое разрешение обеспечивается участием в схеме интерферометрического комплекса вспомогательных телескопов, образующих конфигурацию двух ортогональных баз длиной более 100 метров (рис.7.8). В дифференциальном режиме можно достичь точности 30 μas для объектов до 21^m , за время накопления около часа.

Телескопы комплекса имеют активную оптику с быстрой коррекцией (adaptive optics and tip / tilt correction). Имеется возможность наблюдать в поле зрения комплекса изображения интерференционных колец одновременно от двух звезд (dual-star feeds) и измерять дифференциальную задержку их оптических путей с высокой точностью, до ±5-10 нм. В состав интерферометрического комплекса входят двухполосный смеситель (Beam combiner) и измеритель интерференционных колец (1.5-2.4 мкм) для астрометрических задач и построения изображений (Fringe tracker), активные линии задержки - длинная до 170 метров (Long delay line) и быстрые (Fast delay lines) в диапазоне 20 метров для компенсации суточного движения наблюдаемого объекта и турбулентного влияния атмосферы, лазерная метрологическая система, система определения нуль-пункта интерферометра с точностью 2-10 мкм (Nulling combiner), система гидирования с точностью 1.2 мкм (Angle tracker).

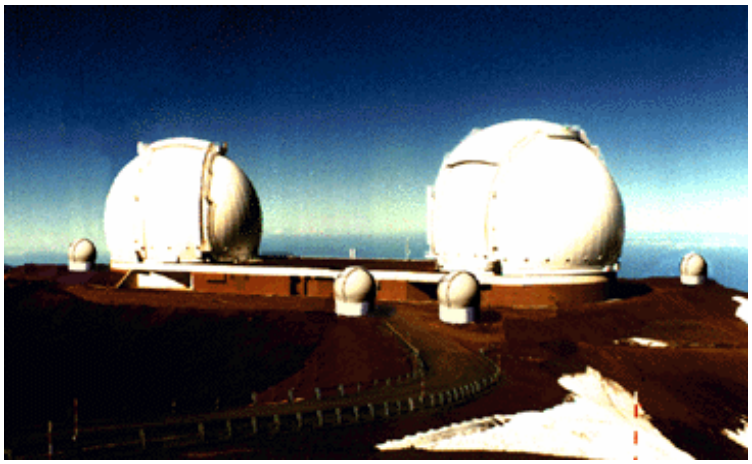

Рис.7.7. Общий вид уникального интерферометрического комплекса Keck I и Keck II обсерватории Mauna Kea (Гавайи, США).

Из основных научных задач, стоящих перед Keck интерферометром следует отметить открытие и изучение новых планетных систем в окрестностях 100 ближайших звезд по программе НАСА - TOPS (Towards Other Planetary Systems), исследование ближайших звезд (горячих карликов) и др. Отмечая важность научного потенциала такого гигантского интерферометрического комплекса для астрофизики XXI столетия, в то же время его высокое угловое

разрешение микросекундного уровня позволит решать и указанные выше астрометрические задачи.

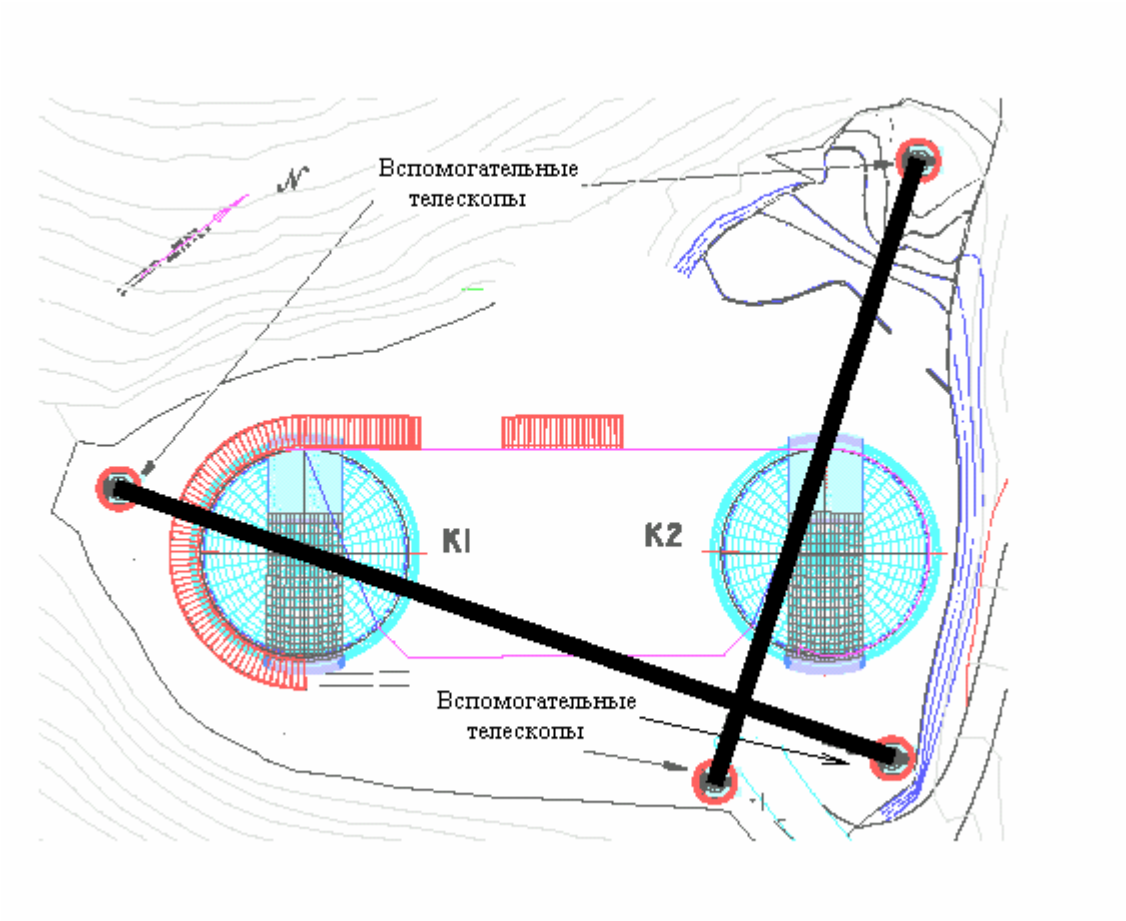

Рис.7.8. Расположение четырех вспомогательных телескопов относительно Keck I и Keck II.

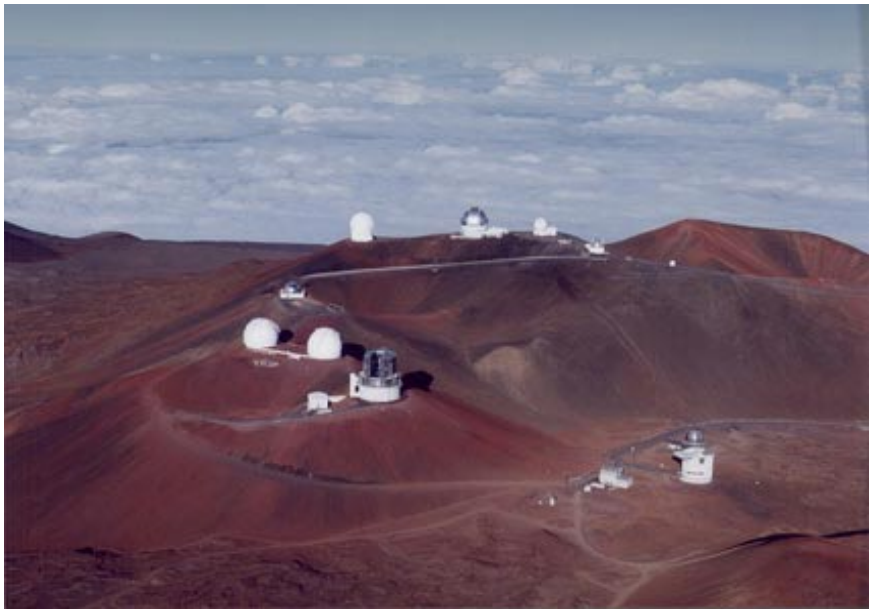

Рис.7.9. Общий вид расположения телескопов обсерватории Mauna Kea (Гавайи, США).

Современные технологические возможности позволяют модифицировать применение оптической интерферометрии в астрономии. Имеются действующие наземные интерферометрические комплексы, связывающие десятки телескопов и проекты создания комплексов с базами до сотен метров (обсерватории Kitt Peak, Canary Islands, Cerro Tololo, La Silla, Mauna Kea и др.). В частности, весьма впечатляюще выглядит предложение по организации интерферометрической связи шести крупнейших телескопов, расположенных на высоте 4200 м обсерватории Mauna Kea. Ввиду уникальности астроклимата этой обсерватории, ее месторасположение считается наилучшим на Земле и поскольку максимальное количество самых больших наземных телескопов расположено именно там — два десятиметровых, четыре восьмиметровых, два четырехметровых телескопа, то возможно создание интерферометрического комплекса с базой до 800 метров (рис.7.9). (проект J.M.Mariotti et all., 1996, A&A Suppl. Ser. 116, 381-393).

Оценивая в целом возможности оптических интерферометрических телескопов и комплексов для наземной астрометрии можно говорить о предельной точности позиционных определений, порядка 1 mas, на больших угловых расстояниях, а с использованием активной оптики и больших интерферометрических комплексов с малым полем предел может быть отодвинут до 10÷100 μas.

Г Л А В А 8

ПЕРСПЕКТИВЫ АСТРОМЕТРИИ

За последние десятилетия в астрономии произошли значительные события, часть из которых имеет принципиальные значения для астрометрии:

- создана международная небесная система отсчета ICRF (International Celestial Reference Frame), опирающаяся на положения 610 внегалактических радиоисточников, полученных методом радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами. Яркость большинства оптических аналогов ERS, порядка, 17-21 звездных величин, а точность положений 0.25 mas;
- успех первого космического эксперимента Hipparcos в 1989-1993 гг. привел к созданию в 1997 году каталога НС, включающего 118 тысяч звезд до 12-й величины и точностью положений 0.77/0.64 mas и собственных движений 0.88/0.74 mas/год по прямому восхождению и склонению, соответственно. С 2000 года каталог НС принят в качестве опорной системы отсчета в оптическом диапазоне HCRF (Hipparcos Catalog Reference Frame);
- широкое применение в астрономии полупроводниковых панорамных приборов с зарядовой связью (ПЗС) включая ПЗС сверхбольшого формата и их совершенствование в сторону приборов с активной ячейкой (APS-active pixel sensors), введение режима полной автоматизации наблюдений, по существу, роботизации телескопов, использование глобальных информационных сетей, устройств, использующих новейшие технологии для хранения огромных массивов наблюденных данных и др.

Под влиянием этих и других факторов задачи наземной астрометрии существенно изменились даже на ближайший, так называемый, Пост- Гиппаркос период.

8.1. Современные программы астрометрии с учетом наземных наблюдательных средств.

Продолжается работа по решению основной задачи позиционной астрономии - поддержанию и уточнению международной системы координат ICRF на основе 610 внегалактических радиоисточников (точность 0.2 mas) путем проведения систематических наблюдений с помощью более 100 РСДБ телескопов, расположенных по всей Земле и связанных в глобальную сеть. Некоторые из этих телескопов входят в состав, примерно 200 геодинамических станций, дополнительно оснащенных лазерными и доплеровскими системами, приемниками GPS для решения также задач поддержания и уточнения земной системы координат (точность 3 мм), координат полюса (точность 0.060 mas), всемирного времени UT1 (точность 3×10^{-12} сек).

Для практического использования достоинств ICRF в радиодиапазоне необходимо иметь ее представление в оптическом диапазоне с такой же точностью. Для этого необходимо распространить ICRF на более яркие звезды 10^m - 12^m, сохраняя при этом высокую точность положений. Каталог НС

рассматривается в настоящее время как наилучшее представление ICRF в оптическом диапазоне наиболее подходящее для практического использования. Изменения параметров НС со временем приводит к тому, что в 2001 году положения звезд в НС ухудшаются до 20-30 mas. Перенаблюдение звезд НС наземными телескопами также дает возможность улучшить собственные движения, а, следовательно, улучшить положения звезд в НС. Наземные инструменты уже в настоящее время включают звезды из НС в программы своих наблюдений с целью поддержания этой опорной системы координат.

Актуальной задачей настоящего времени является улучшение связи между оптической (HCRF) и радио (ICRF) системами отсчета. На среднюю эпоху наблюдений каталога НС 1991.25 связь HCRF с ICRF была известна с точностью 0.6 mas (в координатах) и 0.25 mas/год (во вращении). Однако, постепенно, из-за наличия собственных движений НС связь ухудшается. Поэтому работу по улучшению связи НС-ICRF продолжают всеми доступными средствами. Более десятка научных групп, работающих над этой проблемой используют различные инструменты (РСДБ, астрографы, HST, инструменты службы вращения Земли, автоматические меридианные телескопы) и методы (прямой и ступенчатой) привязки. В итоге этих усилий современные значения параметров связи варьируются в широком диапазоне от ±4 mas до ±100 mas.

Проблема расширения НС на слабые звезды также очень важна, поскольку НС обеспечивает параметры лишь около трех звезд на один квадратный градус, главным образом, 9-й величины. В связи с малыми полями зрения больших телескопов, а также широким распространением ПЗС приемников выявилась необходимость наличия достаточного количества опорных звезд с высокой точностью в малых площадках. Практически, нужно иметь не менее 200 опорных звезд на один квадратный градус, т.е. каталог с общим числом звезд около 8 миллионов. Создание опорного каталога положений звезд до 15-16 величин крайне необходимо для дифференциальной астрометрии малых полей при последующих определениях астрометрических параметров звезд до 20-21 величин. При использовании ПЗС наземных инструментов возможно получение расширенной опорной системы координат с точностью, порядка 30 миллисекунд.

В перечень актуальных программ для наземной астрометрии входят также и позиционные наблюдения тел Солнечной системы в системе HCRF для уточнения их движений и масс, динамических систем отсчета и их связи с ICRF; мониторинг пространства Солнечной системы с целью обнаружения и изучения новых объектов, в том числе АСЗ; определение высокоточных положений небесных объектов в избранных (калибровочных) площадках для различных программ (MEGA, ERS поля и др.); наблюдения промежуточных опорных звезд с целью передачи системы HCRF на пластинки Шмидта; создание плотных входных каталогов для новых космических проектов (табл.8.1) и т.д.

Высокий уровень точности современных астрометрических наблюдений, особенно космическими средствами поставил перед астрометрией ряд задач астрофизического характера и звездной астрономии: уточнение шкалы расстояний (параллаксов), лучевых скоростей и масс ближайших, ярких небесных объектов; определение орбитальных движений долгопериодических двойных и кратных звездных систем. Точная астрометрия невозможна без фотометрии (переменные звезды, звездные скопления и пр.) и наблюдений небесных объектов в разных диапазонах (полосах) длин волн.

Выполнение рассмотренных программ обеспечивается реальными возможностями наблюдений посредством космических и наземных астрометрических телескопов до десятков и сотен миллионов звезд ежегодно, яркостью до 18-22 величин, с высокой точностью и быстродействием. В табл. 1.4, 6.1,7.1 показаны современные действующие и планируемые программы позиционной астрономии, решаемые рассмотренными наземными средствами с достаточной эффективностью. При уровне предельной точности измерений на больших угловых расстояниях, порядка 1÷10 mas, а с использованием активной оптики и больших интерферометрических комплексов при точности измерений в малых полях, порядка 10÷100 μas вполне возможно перед будущими космическими проектами, а в дальнейшем и при взаимодействии с ними успешное решение большинства астрометрических программ наземными средствами.

8.2. Астрометрия микросекундного уровня точности.

Повышение точности ICRF до уровня нескольких микросекунд в перспективе возможно за счет размещения одной или нескольких РСДБ станций на околоземной орбите или на Луне. С 1997 года начаты работы по космической радиоинтерферометрии на японском спутнике VSOP (VLBI Space Orbiter Project) с базой около 31 тысячи километров (номинальное разрешение 55 микросекунд). При размещении станции на Луне база РСДБ будет увеличена более чем на порядок. Несомненно, преимущество расположения РСДБ в Космосе – отсутствие влияния тропосферных и ионосферных эффектов на прохождение радиоволн, хотя остается главная проблема – нестабильность структуры радиоисточников.

Наиболее эффективный вариант улучшения НС - получить вторую эпоху наблюдений. На это ориентированы космические проекты DIVA (ESA), FAME (NASA, США) начало работы которых запланировано в 2003 году, окончание - через 2-5 лет (см. табл.8.1). В программах этих проектов предусмотрено получение пяти астрометрических параметров 40 млн. звезд до 15-й величины и точностью 0.15-0.5 mas. Новые проекты XXI века, как например, космический интерферометр GAIA обещают еще более впечатляющие результаты: точность должна быть повышена до 4-20 микросекунд для звезд до 16-20 величин, при количестве до 500-1000 млн. звезд и времени наблюдений 10 лет.

Табл.8.1. Проекты космических интерферометров для астрофизики и позиционной астрономии.

Название проекта	Технические данные: количество и размеры базы, оптические параметры	ПЗС-приемник, угловое поле	Число звезд, научные задачи	Предельная звездная величина	Точность определения 5 астрометрич. параметров	Начало проекта и период работы
FAME (NASA) Full-sky Astrometric Mapping Explorer	2 базы, длина 0.5 m; базовый угол $81^0 5$ град, апертура 0.6	Мозаика из 24 ПЗС (4096x2048), сканирование, FOV $[1^0.1]$	40 млн, определение 5 астрометр. Параметров	$5 \div 15^m$	±50 μas до 9^m ±0.5 mas до 15^m	2004 г.; 5 лет

	м, F=15m					
DIVA (ESA) Double Interferometer for Visual Astrometry	База 15 см, базовый угол 100 град, апертура 7.5 см, F=16.2 m	2 мозаики из 10 CCD (1Kx1K), сканирование, FOV [0^0.5]	40 млн, определение 5 астронометр. параметров, фотометрия	15^m	±0.15 mas ±0.3 mas/год ±0.20 mas (π)	2003 г.; 2 года
LIGHT (NAZDA, Япония)	База около 1 м, апертура 17.5 см, F=20m	8 CCD, спектр. Система от V до K, сканирование, FOV [0^0.3]	100 млн, определение 5 астрометр. Параметров, фотометрия	До 18^m	±1 mas ±10 μas 50 μas до 15^m	2010 г.; 3 года
SIM (NASA) Space Interferometry Mission	Переменная база (7), длина до 10 м, Апертура 0.5 м.	Камера высокого динамического диапазона (HLRC), прибл. 14 зв. вел; кадровый режим	10 000, избранные объекты, астрометр. Параметры	До 20^m	±4 μas до 12^m ±300 μas до 20^m	2007 г.; 5 лет
GAIA (NASA) Global Astrometric Interferometer for Astrophysics	2 базы, длина 3м, базовый угол 106 гр, апертура [1.7 x 0.7 m^2], F=50m	Мозаика из 250 ПЗС матриц (2100x2600), сканирование FOV [1^0]	1 млрд., определение 5 астрометр. Параметров, фотометрия в 6 полосах	16-20^m	4 – 20 μas ±4 μas до 12^m ±10 μas до 15^m ±200 μas до 20^m	2009 г.; 10 лет.

Менее известный, однако имеет большие перспективы осуществления проект лунного оптического интерферометра (LOI – Lunar optical interferometer): спектральный диапазон 0.1 - 10 мкм, диаметр зеркал около одного метра. Схема интерферометра включает минимум три телескопа, расположенных на концах Y-образной базы, протяженностью от одного до нескольких километров. Посредством такого инструмента можно наблюдать отдельные объекты до 20-й звездной величины с недостижимой на Земле точностью, около одной угловой микросекунды (0.”000001 = 1 мксек). Разработанный в NASA интерферометр LOI предназначен для решения задач астрометрии малых полей - определение собственных движений звезд относительно внегалактических опорных объектов, уточнение внегалактической шкалы расстояний, изучение динамики и структуры двойных и кратных звездных систем, ближайших галактик, поиск и изучение планетоподобных (типа Юпитера) объектов, проверку общей теории относительности и др.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Витязев В.В.* Системы отсчета и будущее наземной астрометрии. Труды ИПА РАН. – вып 6 / отв. Редактор А.М. Финкельштейн. –СПБ, ИПА РАН, 2001.
2. *Губанов В.С.* Обобщенный метод наименьших квадратов. Теория и применение в астрометрии. – Санкт-Петербург: Наука, 1997. – 319 с.
3. Кинематика и Физика Небесных тел. Приложение 1 / Главный ред. *Я.С. Яцкив*. – ГАО НАНУ, 1999 –136 с.
4. *Маррей К.Э.* Векторная астрометрия – возможности и перспективы. Известия РАН / серия физ. – т.62. – 1998. - №9. – СС.1774-1779.
5. *Пинигин Г.И.,* 1998. Наземная астрометрия - возможности и перспективы, Известия РАН, серия физ., т.62. – 1998. - N 9. - СС 1774-1779.
6. *Пинигин Г.И.* Достижения и проблемы наземной астрометрической техники. Труды ИПА РАН. – вып. 6 / отв. Редактор А.М. Финкельштейн. – СПБ, ИПА РАН, 2001.
7. *В.В.Подобед, В.В.Нестеров.* Общая астрометрия. М.: Наука. - 1982. – 576 с.
8. Применение ПЗС методов для исследования тел Солнечной системы. Труды конф. 5-9 сентября 1999 г. / отв. редактор *Г.И. Пинигин.* – Николаев: Атолл, - 2000. – 112 с.
9. *Ризванов Н.Г.* Фотографическая астрометрия. Учебное пособие. Изд. Казанского университета. - Казань. – 1991. – 154 с.
10. Современные проблемы и методы астрометрии и геодинамики. Труды конференции. Санкт-Петербург / отв. редактор *А.М. Финкельштейн.* – 1996. – 377 с.
11. *Токовинин А.А.* Звездные интерферометры. – М.: Наука. – 1988. – 160 с.
12. http://huey.jpl.nasa.gov/keck/ KIIA
13. http://www.eso.org/vlt VLTI
14. http://www.naoj.org SUBARU
15. http://www.sdss.org SLOAN
16. http://www.usno.navy.mil AMT FASTT
17. http://www.ast.cam.ac.uk AMT CAMC
18. Journees 1999, “Systemes de reference Spatio-Temporels” & IX. Lohrmann-Kolloquium, Dresden, 13-15 September, ed. By M.Soffel and N. Capitaine, Lohrmann-Observatorium Technische Universitat Dresden, 237 p.
19. *Kovalevsky J.*, Modern astronomy, 1995, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 352 p.
20. *R.C. Stone and C.C. Dahn.* CCD Astrometry, IAU Symp.166 "Astronomical and Astrophysical Objectives of Sub-Milliarcsecond Astrometry", Hog E. and Seidelmann P.K. (eds), Kluwer, Dordrecht. Kluwer. 1995. p.3-8.
21. *Seidelman P.K.*, 1997. Astrometry in the Future, Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, pp.97-106.

22. Towards models and Constants for Sub-microarcsecond Astrometry, Proceedings of IAU Colloquium 180. Ed. by *K.J. Johnston, D.D.McCarthy, B.J.Luzum, G.H.Kaplan,* USNO, USA, 2000, 300 p.

ОГЛАВЛЕНИЕ.

Предисловие.

Введение.

Глава 1. Проблемы и ограничения наземной астрометрии.

1.1. Возможности наземных методов определения координат.
1.2. Инструментальные проблемы.
1.3. Приемники света.
1.4. Рефракционный барьер.

Глава 2. Возможности меридианных телескопов с автоматическим управлением.

2.1. Требования к современному меридианному телескопу.
2.2. Обзор современных МТ классической системы.
2.3. FASTT (Морская обсерватория, США).
2.4. CAMC (о.Ла Пальма, Испания).

Глава 3. Меридианный телескоп зеркально-линзовой системы.

3.1. Описание фотографического вертикального круга Л.А. Сухарева (Пулковская обсерватория).
3.2. Основные технические данные ФВК (ПМТ).
3.3. Результаты исследований.
3.4. Итоги и программы наблюдений.

Глава 4. МК горизонтальной конструкции в меридиане.

4.1. Описание Горизонтального меридианного круга Л.А. Сухарева (Пулковская обсерватория).
  4.1.1. Схема, методические особенности.
  4.1.2. Конструкция.
  4.1.3. Система программного управления (СПУ) ГМК.
4.2. Теория ГМК
  4.2.1. Прямые восхождения.
  4.2.2. Склонения.
4.3. Результаты исследования ГМК.
4.4. Итоги наблюдений и перспективы ГМК.
  4.4.1. Каталоги, полученные в 1970-90 гг.
  4.4.2. Перспективы ГМК – проект МАГИС.

Глава 5. МК горизонтальной конструкции в первом вертикале.

5.1. Принципиальная схема и особенности АМК (НАО, Украина).
5.2. Описание, основные характеристики АМК.
5.3. Методы исследований и наблюдений.
5.4. Результаты исследований и наблюдений.
5.5. Программа наблюдений на АМК.

Глава 6. Телескоп-астрограф на параллактической монтировке.

6.1. Особенности наблюдений на астрографе с ПЗС регистрацией.
6.2. Описание избранных ПЗС телескопов.
  6.2.1. SLOAN (APO, USA).
  6.2.2. VST (ESO, Чили).
  6.2.3. A3T-22 (Казанский университет, Турция).
6.3. Согласованные наблюдения на автоматических меридианных телескопах и астрографах.
6.4. Большие телескопы для астрометрии.
6.5. Современные программы наблюдений.

Глава 7. Оптические интерферометры в астрономии.

7.1. Метод оптической интерференции (интерферометр Майкельсона).
7.2. Наземные интерферометры.
7.2.1. Звездный интерферометр MARKIII (Mt. Wilson Observatory-USNO, США).
7.2.2. Интерферометрический комплекс NPOI (USNO, США).
7.3. Интерферометрическая связь больших наземных телескопов.
7.3.1. Интерферометрический комплекс VLTI (ESO, Чили).
7.3.2. Интерферометрический комплекс KIIA (Гавайи, США).

Глава 8. Перспективы астрометрии.

8.1. Современные программы астрометрии с участием наземных наблюдательных средств.
8.2. Астрометрия микросекундного уровня точности.

Литература.

Оглавление.