

УДК 520.2

## Возможности меридианного круга горизонтальной конструкции

Г. И. Пинигин

На основе данных, полученных при исследовании горизонтального меридианного круга ГАО АН СССР, проанализированы преимущества и недостатки этой схемы меридианного инструмента. Рассмотрены условия реального отсутствия ошибок гнутя, показана высокая стабильность системы горизонтального инструмента. Отмечено, что введение полной автоматизации существенно расширяет возможности ГМК. Предложено дальнейшее совершенствование схемы ГМК с расположением горизонтальных труб в меридиане.

*CAPABILITIES OF A MERIDIAN CIRCLE OF HORIZONTAL TYPE, by Pinigin G. I.*— Advantages and disadvantages of the scheme of the horizontal meridian circle (HMC) at Pulkovo are analysed. The cases of real absence of flexure errors are considered, high stability of the system of the horizontal circle is shown. It is noted that the introduction of full automation essentially increases the capabilities of the HMC. Several proposals are given with the aim of improving the HMC system.

**Введение.** В 1960-е годы в ГАО АН СССР по идеям Л. А. Сухарева был построен горизонтальный меридианный круг (ГМК). Длительное изучение и исследование этого инструмента к настоящему времени в основном завершено. В 1986 г. на нем начаты регулярные определения координат звезд в автоматическом режиме.

Цель работы — показать преимущества и недостатки схемы ГМК с расположением горизонтальных труб в меридиане на основе опыта наблюдений прямых восхождений и склонений звезд.

**Краткая характеристика ГМК.** ГМК оснащен устройством автоматического наведения на звезды с точностью установки зеркала  $\pm 2''$ . Максимальное время позиционирования при повороте на  $90^\circ$  — не более 15 с. Автоматическая система позволяет отсчитывать разделенный круг по четырем микроскопам с точностью  $\pm 0.02''$ . Время отсчета — не более 12 с. Регистрация прохождений звезд осуществляется фотоэлектрическим окулярным микрометром с активным щелевым анализатором поля. Предельная звездная величина —  $11^m$ . Время регистрации одной звезды можно устанавливать в пределах 20—60 с, общее время для наблюдения и обработки одной звезды — не более 1.5 мин. Положение отвесной линии определяется посредством маятникового зеркального горизонта с погрешностью  $\pm 0.05''$  [2, 13, 14].

По результатам выполненных наблюдений получена точность определения (в случайном отношении) прямых восхождений  $\pm 0.011^s \sec \delta$ , склонений  $\pm 0.20'' \sec z$  [4, 8].

**Результаты исследования ГМК.** Центральным узлом. Он включает металлическое зеркало с лимбом и цапфами, является оригинальным и самым ответственным за систему инструмента. Существенная особенность конструкции зеркала — его монолитность с осью, т. е. отсутствие оправы.

О стабильности формы зеркала в плоскости горизонта можно судить по изменению его коллимации. Получена уверенная корреляционная связь коллимации с сезонным ходом температуры около  $0.004''$  на  $1^\circ\text{C}$  [8]. Изменения коллимации в зависимости от суточного хода температуры не обнаружены. Таким образом, форма металлического зеркала в горизонтальной плоскости устойчива и слабо зависит от температуры. В вертикальной плоскости изменение формы зеркала — более сложное [4]. Разработанный Т. Р. Кирьян способ исследования деформаций зеркала посредством измерения изменения фокусировки системы зеркало — объектив при разных углах установки зеркала позволяет сделать вывод о том, что деформация металлического зеркала ГМК под действием силы тяжести не превышает  $0.05 \text{ мкм}$ , откуда соответствующая величина гнутя составляет  $(0.01—0.02'') \sin 2z$ . Однако необходимо уделить внимание особенностям геометрической схемы ГМК, определяющим гнутие. Они заключаются в несовпадении отражающей поверхности зеркала с его осью вращения, а также в сме-

щении оси вращения зеркала относительно оптической оси горизонтальной трубы. Такое смещение сделано для увеличения зоны склонений звезд, наблюдаемой без виньетирования объектива краями зеркала. При наличии кривизны отражающей поверхности зеркала необходимо учитывать ошибку определения положения объекта наблюдений с учетом приведенных особенностей. Поэтому для минимизации эффекта, аналогичного гнутю, необходимо, чтобы либо отражающая поверхность зеркала была более плоской, либо совпадала с осью вращения зеркала. В противном случае необходимо знать и контролировать поведение формы отражающей поверхности зеркала со временем и температурой.

Как недостаток ГМК обычно отмечают удвоение ошибок, связанных с отсчетами разделенного круга, с неправильностями цапф и отражающей поверхности зеркала. Эти особенности ГМК, по нашему мнению, не имеют принципиального характера, а их влияние зависит от качества изготовления зеркала, цапф, от точности отсчета разделенного круга. Ошибки цапф пулковского ГМК при наблюдении прямых восхождений были тщательно исследованы и учтены [10]. Впоследствии они существенно уменьшены до пренебрежимо малых величин за счет высокого качества изготовления цапф (0.1 мкм). Отсчетная система круга, как уже отмечалось, имеет высокую точность — около  $\pm 0.02''$  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 отсчетом разделенного круга, не является недостатком, поскольку оно полностью исключается [1, 3].

Следует отметить, что задача закрепления стеклянного лимба в металлической оправе, а последней — на оси зеркала, решена на ГМК достаточно корректно. Об этом свидетельствует изменение точки экватора разделенного круга ГМК (0.1" на 1°C), типичное для меридианных кругов других конструкций [5].

Ориентировка ГМК. Наличие в меридиане двух неподвижных горизонтальных и направленных друг на друга труб позволяет создать в схеме ГМК уникальную автоколлимационную систему, с помощью которой можно следить за ориентировкой зеркала и состоянием параметров инструмента.

Система ГМК из двух длиннофокусных труб ( $F=4.2$  м) должна быть стабильной по азимуту и наклонности. Исследования взаимной устойчивости труб ГМК по азимуту показали, что изменения угла между трубами с сезонными и суточными периодами коррелировали с температурой и составляли 0.1 и 0.07" на 1°C соответственно [7], сезонные и суточные изменения наклонности труб — соответственно 1.3—1.7 и 0.35" на 1°C [5].

Взаимную стабильность труб по азимуту можно считать удовлетворительной, хотя имеются возможности ее улучшения. В частности, закладные детали объективов и окуляров размещены несимметрично в верхних частях столбов фундаментов, и столбы не защищены соответствующим образом от температурного влияния окружающей среды. Кроме того, наличие протяженного тепломемкого павильона, расположение в нем обогреваемой кабины с аппаратурой и наблюдателем не способствовали установлению в инструменте однородного температурного поля, а следовательно, и лучшей устойчивости инструмента. Устранение отмеченных недоработок, допущенных при изготовлении инструмента, несомненно улучшит его характеристики. Зеркало ГМК с осью 750 мм изменяло азимут на величины 0.3" на 1°C (сезонный период) и 0.5" на 1°C (суточный период) [7]. Во время наблюдений звезд суточные изменения азимута зеркала относительно труб учитывались с высокой точностью посредством автоколлимационных измерений, предусмотренных автоматическим режимом работы ГМК.

Следует отметить, что устойчивость труб ГМК по азимуту сравнима с устойчивостью классических мир [11]. Действительно, сезонные и поступательные изменения азимута труб в течение двух лет не превышали 0.4" [7].

Изменения наклонности труб, особенно сезонного периода, значительно больше значений, которые можно ожидать из простого пересчета эмпирических значений изменений наклонности горизонтальной оси классического МК на длиннофокусные трубы ГМК. Проведенные исследования выявили следующую причину: столбы, поддерживающие объективы и окуляры труб ГМК, установлены на едином протяженном фундаменте, не защищенном от температурного влияния окружающей среды (обваловка отсутствует). Как показали измерения, в фундаменте возникали значительные вер-

тикальные температурные градиенты, что в свою очередь приводило к упругим деформациям всего фундамента, и следовательно, к изменениям наклонности труб. Эти изменения хорошо коррелируют с температурой фундамента и их легко учесть посредством «привязки» труб к отвесной линии с помощью маятникового зеркального горизонта или путем переделки фундамента [4, 5]. Суточные изменения наклонности труб во время наблюдений звезд, как и изменения азимута зеркала, тщательно учитывались посредством автоколлимационных измерений с маятниковым зеркальным горизонтом, предусмотренных автоматическим режимом работы ГМК.

**П а в и л ь о н н а я р е ф р а к ц и я.** Исследование аномалий рефракции в павильоне ГМК, кроме общих проблем, характерных также для меридианных кругов других конструкций, имеет особенности, на которых следует остановиться.

Прежде всего, это связано с горизонтальным ходом лучей при различных условиях на двух участках: между зеркалом и объективом трубы и в трубе. Исследование на участке зеркало — труба показало, что увеличение ошибки отсчета, обусловленное турбулентцией воздуха, можно устранить путем введения на время измерения параметров инструмента дополнительной экранирующей трубы [6]. При наблюдениях звезд планировалось использовать, по предложению Л. А. Сухарева, желоб-получилиндр. Однако измерениями Т. Р. Кирьян выявлено распределение температуры вдоль желоба, что приводило к возникновению воздушной призмы, которая могла бы вносить систематические искажения звезд. Поэтому наблюдения звезд проводились без желоба. Тем более что дополнительные исследования показали, что отсутствие желоба не влияет на точность наблюдений звезд в случайном отношении.

Для устранения вертикального градиента температуры в каждой трубе ГМК проводилась принудительная вентиляция воздуха в промежутке между внутренней и внешней стенками. Исследования влияния вентиляции на рефракцию в трубах ГМК показали, что при вертикальном градиенте температуры  $0.1^\circ$  на диаметр возможна рефракция в трубе примерно  $0.27 \pm 0.05''$ . Принудительная вентиляция позволяет получить градиент температуры воздуха внутри трубы порядка нескольких сотых долей градуса на диаметр и таким путем существенно уменьшить и стабилизировать возможное влияние аномальной рефракции внутри трубы.

Таким образом, при соблюдении отмеченных выше условий влияние аномальной рефракции на горизонтальном участке зеркало — окулярный микрометр может быть сведено к пренебрежимо малой величине, что позволяет исключить этот эффект из перечня недостатков ГМК.

**С и с т е м а Г М К.** О стабильности системы ГМК по прямому восхождению и склонению можно судить на основании большого объема наблюдений [4, 6, 10]. Сезонных изменений системы ГМК вида  $\Delta\mu_\delta$ ,  $\Delta M_\delta(\delta)$ , превышающих уровень ошибок их определений, не обнаружено. Изменения температуры при этом достигали около  $\pm 30^\circ$ . Точность определения бесселевой величины составляла в среднем  $\pm 0.010^s$ . Точки экватора получены с ошибкой  $\pm 0.05$ — $0.10''$  в десятиградусных зонах склонения.

Окончательная система ГМК по прямому восхождению и склонению (в смысле «каталог ГМК — опорный каталог») показала хорошее согласие с системами других каталогов северного неба. Это свидетельствует о достаточно полном учете инструментальных ошибок ГМК и о надежной привязке системы ГМК к системе опорного каталога FK4 [4, 10].

**П р о г р а м м н о е у п р а в л е н и е.** Выполнение наблюдений звезд в автоматическом режиме с использованием программного управления (ПУ) позволяет оперативно учитывать ошибки инструмента и выбирать более оптимальный алгоритм определения координат небесных объектов. Отметим эти особенности при использовании ПУ на пулковском ГМК.

Прежде всего ПУ позволяет совершенно единообразно выполнять как наблюдения звезд, так и автоколлимационные измерения, необходимые для определения и учета инструментальных параметров. Причем последнее занимает минимальное время. Например, на ГМК за время примерно 8 мин определяется азимут зеркала относительно труб, наклонность зеркала, нуль-пункт разделенного круга и наклонность труб. ПУ позволяет реализовать адаптивный режим определения параметров ГМК, зависящий от условий наблюдений. Величина инструментального параметра задает такую скорость определения, чтобы ошибки интерполяции были пренебрежимо малы. ПУ позволяет включить в перечень оперативных работ такие исследования, которые

раньше выполнялись эпизодически, например исследования круга, цапф и др. Вообще надо отметить, что ГМК в автоматическом режиме наиболее эффективно работает с развитым программным обеспечением, когда можно реализовать широкий контроль параметров инструмента, использовать уникальные свойства двухтрубной конструкции ГМК [9], организовать высококачественные наблюдения, обработку и получение координат большого числа звезд с высокой точностью.

**Улучшение ГМК.** Особенности ГМК. Проведенные исследования ГМК позволяют с новых позиций оценить особенности этой схемы меридианного инструмента. С одной стороны, окончательно подтверждены принципиальные достоинства горизонтальной конструкции: а) применение металлического монолитного с осью зеркала значительно уменьшило ошибки, связанные с гнупием; б) неподвижно расположенные две трубы (при этом корпуса труб не связаны с объективами и окулярами) повышают в принципе устойчивость инструмента, создают возможность более полного контроля поведения зеркала без введения дополнительных коллиматоров и мир. При этом наблюдения звезд в две трубы в общей зенитной зоне являются независимым дополнительным контролем качества наблюдений. Следует отметить и такое достоинство ГМК, как неизменное положение труб, позволяющее использовать окулярные регистрирующие устройства без ограничений по массе и габаритам.

Из принципиальных недостатков ГМК следует отметить отсутствие возможности постоянного контроля положения оси вращения зеркала, т. е. схема ГМК не позволяет во время наблюдений прохождений звезд через меридиан одновременно определять ориентировку зеркала относительно труб и отвесной линии. Но при удовлетворительной устойчивости и плавных изменениях параметров ориентировки ГМК этот недостаток можно компенсировать высокоточными дискретными определениями параметров ориентировки и их последующим интерполированием на моменты наблюдений звезд. Тем более что в полном объеме эта задача еще не решена ни на одном из существующих меридианных кругов.

ГМК второго поколения. Современные астрометрические программы предусматривают наблюдения до одной звезды на один квадратный градус и более до  $12-13^m$  и слабее, характеризуются короткими сроками их выполнения и точностью определения координат до  $\pm 0.02-0.03''$ . Очевидно, что эффективное решение подобных задач возможно лишь посредством автоматического меридианного круга с характеристиками, удовлетворяющими поставленным условиям.

Рассмотрим, как инструмент типа ГМК может быть использован для выполнения таких программ.

Центральный узел ГМК может быть использован без существенных изменений. Для исключения влияния кривизны и достижения требуемой плоскостности отражающей поверхности зеркала (до  $0.10 \lambda$ ) следует изготавливать зеркало круглой формы. Симметричную форму зеркала, когда ось его вращения проходит через его центр тяжести и не совпадает с отражающей поверхностью, видимо, следует сохранить для обеспечения жесткости зеркала в целом. В этом случае при условии получения требуемой плоскостности отражающей поверхности зеркала эффектов, аналогичных гнупию, не должно быть. Правда, остаются чисто технические проблемы сохранения покрытия отражающей поверхности зеркала на приемлемый срок выполнения астрометрических программ. Из опыта работы с металлическим зеркалом пулковского ГМК можно рекомендовать изготовление и использование двух смесных зеркал со сроком эксплуатации зеркала 3—4 года и коэффициентом отражения зеркала около 0.9.

Для обеспечения более высокой стабильности ориентировки ГМК целесообразно увеличить фокусное расстояние главных труб по сравнению с пулковским ГМК в 2—3 раза без существенных изменений в конструкции окулярных микрометров. Можно отказаться от использования мир, поскольку устойчивость главных труб обеспечит определение ориентировки инструмента, например групповым цепным способом, и следовательно, координат звезд абсолютным способом. Разумеется, от общего фундамента следует отказаться. Павильон ГМК должен иметь изолированную центральную часть с зеркалом и объективами концами труб и два отдельных помещения для северного и южного окулярных концов труб. Представляет интерес предложение Л. А. Сухарева о радиационно-симметричном павильоне в целях получения однородных условий для инструмента [12]. В павильоне ГМК должно быть предусмотрено кондиционирование внутренних объемов инструмента и фундамента. Необходимо также ввести ва-

куумирование труб для полного исключения аномалий рефракции, а кабину для электронной аппаратуры и наблюдателя удалить от павильона.

**Закключение.** Проведенные исследования пулковского ГМК подтвердили принципиальные преимущества конструкции меридианного инструмента с расположением горизонтальных труб в меридиане. Исследования обнаружили новые положительные свойства ГМК при использовании высокоточных регистрирующих устройств и программного управления. Выявленные недостатки ГМК (значительное изменение наклонности труб, неплоскость отражающей поверхности зеркала) имеют непринципиальный характер и могут быть устранены при более качественном изготовлении этих деталей.

С учетом отмеченных особенностей и предложений можно ожидать, что ГМК второго поколения будет одним из наиболее точных в систематическом и случайном отношениях меридианных инструментов, предназначенных для эффективного решения современных астрометрических задач.

1. Гумеров Р. И. Повышение эффективности астрометрических наблюдений на основе программно-управляемого измерительного комплекса: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук.—Л., 1988.—15 с.
2. Гумеров Р. И., Капков В. Б., Пинигин Г. И. Автоматический горизонтальный меридианный круг в Пулкове // Кинематика и физика небес. тел.—1985.—1, № 4.—С. 93—98.
3. Гумеров Р. И., Кирьян Т. Р., Пинигин Г. И. Оперативный контроль и исследование поправок делений лимба // Там же.—1986.—2, № 6.—С. 47—50.
4. Кирьян Т. Р. Исследование системы склонений пулковского горизонтального меридианного круга Л. А. Сухарева: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук.—Л., 1988.—17 с.
5. Кирьян Т. Р., Пинигин Г. И., Тимашкова Г. М. Особенности поведения параметров ориентировки пулковского ГМК // Письма в Астрон. журн.—1984.—10, № 2.—С. 143—148.
6. Пинигин Г. И. Предварительные результаты исследования системы горизонтального меридианного круга Л. А. Сухарева // Тр. 18-й астрометр. конф. СССР.—Л.: Наука, 1972.—С. 158—165.
7. Пинигин Г. И. Определение ориентировки труб и зеркала горизонтального меридианного круга Л. А. Сухарева // Изв. Глав. астрон. обсерватории в Пулкове.—1975.—№ 193.—С. 109—116.
8. Пинигин Г. И. Система прямых восхождений горизонтального меридианного круга Пулковской обсерватории // Современные проблемы позиционной астрометрии.—М.: Изд-во Моск. ун-та, 1975.—С. 95—100.
9. Пинигин Г. И. О методе определения прямых восхождений звезд на горизонтальном меридианном круге // Астрон. журн.—1976.—53, вып. 4.—С. 903—910.
10. Пинигин Г. И. Результаты определения поправок прямых восхождений 188 звезд со склонениями от  $-10^\circ$  до  $+86^\circ$ , полученных из наблюдений на горизонтальном меридианном круге Л. А. Сухарева // Изв. Глав. астрон. обсерватории в Пулкове.—1976.—№ 194.—С. 105—118.
11. Пинигин Г. И. О поведении азимута пассажного инструмента во время астрономических наблюдений на о. Шпицберген // Там же.—1980.—№ 197.—С. 29—33.
12. Сухарев Л. А. Радиационносимметричный павильон // Там же.—1974.—№ 192.—С. 90—91.
13. Gumerov R. I., Kapkov V. B., Pinigin G. I. Automatic horizontal meridian circle at Pulkovo // *Astrometric Techniques* // Eds by H. K. Eichhorn, R. I. Leacock.—Dordrecht etc.: Reidel, 1986.—P. 459—462.
14. Gumerov R. I., Kapkov V. B., Kirijan T. R., Pinigin G. I. Potentialities of the computer controller horizontal meridian circle at Pulkovo // *Bull. Observ. Astron. Belgrad.*—1987.—N 137.—P. 30—33.

Николаев. отд-ние  
Глав. астрон. обсерватории АН СССР

Поступила в редакцию 12.07.88,  
после доработки 21.10.88