

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВРАЩЕНИЯ И СТАБИЛЬНОСТИ ПОЛОЖЕНИЯ ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ОСИ БТА АН СССР

В. Я. Вайнберг, С. И. Грызулин

Изложена методика измерений характеристик горизонтальной (второй) оси вращения монтировки БТА, описаны аппаратное обеспечение, теоретические принципы и результаты их анализа. Обнаружена температурная зависимость взаимного положения первой (вертикальной) и второй осей вращения и приведено описание реализованной системы оперативного контроля этого положения.

Methods of measuring the characteristics of horizontal (second) rotation axis of BTA are considered. The hardware, theoretical principles and the results of their analysis are described. A temperature relation of the reciprocal position of the first (vertical) and the second rotation axes is detected. A description of the realized system of operative control of this position is given.

Как уже сообщалось [1], на БТА АН СССР ведутся работы по уменьшению ошибок наведения и сопровождения телескопа. Частью этих исследований является изучение погрешностей вращения частей монтировки и стабильности положения осей вращения.

Результаты по первой (вертикальной) оси приведены в [1], здесь же изложены методика и результаты исследований второй (горизонтальной) оси телескопа.

Задача определения точностных параметров ее состояла в изучении регулярных возмущений вращения, оценке случайных биений в опорных подшипниках и в определении положения второй оси относительно первой.

Исходными данными для получения этих характеристик служили угловые координаты некоторого вектора, жестко связанного со средником телескопа, измеренные при вращении трубы по зенитному расстоянию. Реализация этого вектора (далее называемого инструментальным) выполнена с помощью внеосевого коллиматора Эри [2] и перископического мостика *МП*.

Коллиматор Эри (*КЭ*) состоит из объектива на одной стороне средника трубы и подсвеченного перекрестья в фокусе объектива на другой стороне средника (рис. 1). Ось *КЭ* примерно параллельна проектному направлению оси вращения и смещена от нее на 350 мм, чтобы «обойти» диагональное зеркало оптического тракта телескопа.

Перископ (*МП*) установлен на среднике независимо от объектива *КЭ* и направляет коллимированный пучок в канал второй оси, выходящий на балкон стойки *Н1*. Направление оси пучка *КЭ* после прохождения *МП* задает инструментальный вектор *u*. Особое внимание при разработке этой системы было уделено конструкции и способу крепления *МП* к среднику, так как возможные весовые деформации перископа при его вращении с трубой телескопа могут привести к искажению истинной траектории инструментального вектора.

Конструкция перископа, разработанная в ЦНИИГАиК, и способ подвески, заимствованный из [3], обеспечивают минимальные воздействия на отражающие зеркала перископа в процессе вращения. Тем не менее конструкция была подвергнута исследованию на специальном стенде для получения остаточных деформаций *МП*. Оказалось, что в рабочем диапазоне поворота трубы ($z = 0 \div 90^\circ$) они носят регулярный характер и не превосходят $0.3'' \pm 0.1''$.

Измерительная установка для регистрации угловых координат включала в себя двухкоординатный измерительный автоколлиматор (*ИК*), возвратный

мостик (*МВ*) и контрольный прибор — горизонтальную нормаль (*ГН*). Схема расположения приборов в этой установке показана на рис. 1. Выбор такой схемы объясняется возможностями расположения приборов на стойке телескопа. Горизонтальная нормаль использована для контроля положения визирной оси *ИК* в вертикальной плоскости.

Коротко о перечисленных здесь приборах, разработанных в ЦНИИГАиК. В качестве автоколлиматора *ИК* использован прибор АКБ [4], который позволяет измерять малые углы в диапазоне 2 угл. мин со ср. кв. погрешностью 0.2".

Прибор *ГН* представляет собой вертикально подвешенное двустороннее зеркало на поворотном основании. Чувствительность подвеса около 0.2".

Возвратный мостик *МВ* близок по конструкции к перископу *МП*. На несущей световодной трубке с одной стороны укреплено плоское зеркало, а с другой — прямоугольная призма с крышей, т. е. в целом *МВ* представляет собой

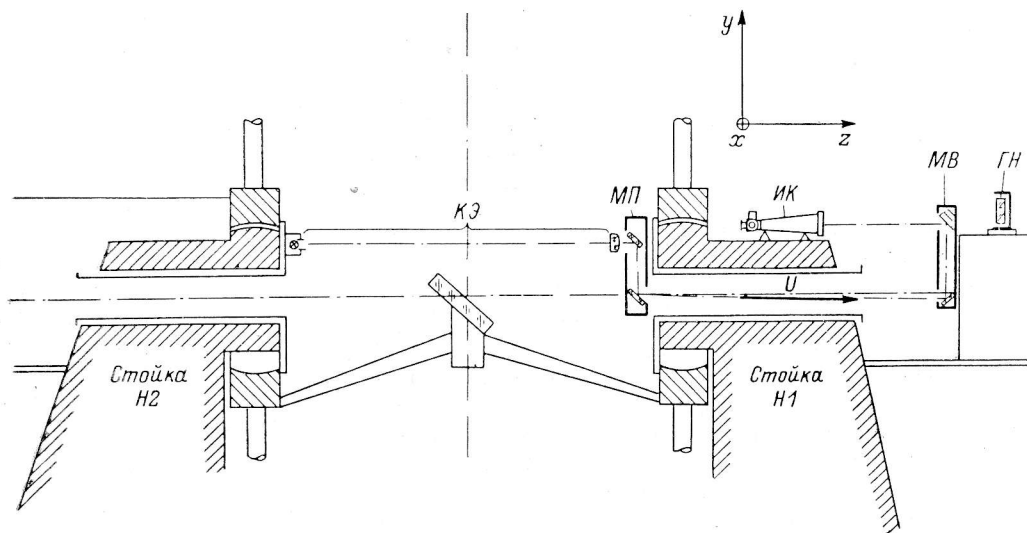


Рис. 1. Схема реализации инструментального вектора и установки для измерения его годографа.

КЭ — коллиматор Эри; МП — перископ; МВ — мостик возвратный; ГН — горизонтальная нормаль; ИК — измерительный автоколлиматор.

аналог трипель-призмы. Условие параллельности осей входящего в *МВ* и выходящего пучков обеспечено предварительной притиркой посадочной поверхности для плоского зеркала. Для определения остаточных погрешностей был изготовлен поверочный стенд, на котором непосредственно во время измерений на телескопе определялись необходимые поправки. Ср. кв. погрешности при этом не превосходили 0.2". Суммарная ср. кв. погрешность определения угловых координат x_i , y_i , годографа u с помощью описанной измерительной установки составляет, таким образом, около 0.5". Здесь ордината y_i — угол между u и горизонтальной плоскостью, задаваемой нормалью к зеркалу *ГН*, а абсцисса x_i — угол между u и вертикальной плоскостью, проходящей через визирную ось *ИК*.

Измерения координат инструментального вектора u выполнялись в диапазоне z от 0 до 90° с шагом 10° в прямом и обратном направлениях, что составляло один цикл измерений. В течение 1984 г. было выполнено 8 циклов таких измерений.

Процедура обработки полученного в цикле измерений годографа состояла в аппроксимации его дугой окружности, разделенной на 10-градусные части под условием минимума суммы квадратов отклонений Δx_i , Δy_i точек годографа от соответствующих им координат точек аппроксимирующей дуги.

Формулы аппроксимации в этом случае имеют вид:

$$\begin{bmatrix} x_n \\ y_n \\ p \\ q \end{bmatrix} = \frac{1}{n^2 - (\sum \sin z_i)^2 - (\sum \cos z_i)^2} \begin{bmatrix} n & 0 & -\sum \sin z_i \sum \cos z_i \\ 0 & n & -\sum \cos z_i \sum \sin z_i \\ -\sum \sin z_i - \sum \cos z_i & n & 0 \\ \sum \cos z_i - \sum \sin z_i & 0 & n \end{bmatrix} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} \sum x_i \\ \sum y_i \\ \sum x_i \sin z_i + \sum y_i \cos z_i \\ \sum y_i \sin z_i - \sum x_i \cos z_i \end{bmatrix},$$

где z_i — угол поворота трубы от начального до i -го положения. Здесь вспомогательные величины p и q в дальнейшем используются для вычисления радиуса r и «начальной фазы» φ аппроксимирующей дуги:

$$r = \sqrt{p^2 + q^2}; \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{p}{q}, \quad i = 1, 2 \dots n.$$

Искомые возмущения вращения находятся по формулам:

$$\Delta x_i = x_i - x_n - r \sin(z_i + \varphi);$$

$$\Delta y_i = y_i - y_n - r \cos(z_i + \varphi).$$

Заметим, что величины Δx_i , Δy_i можно рассматривать как текущие координаты некоторого вектора O (назовем его осевым), обладающего, как выяснилось при специальном анализе, двумя важными свойствами. Во-первых, его траектория (годограф) не зависит от начального положения инструментального вектора, который использовался при измерениях, а является следствием только конструктивных особенностей оси вращения. Во-вторых, этот годограф принадлежит реально существующему вектору, связанному с вращающимся телом и отличающемуся от всех других тем, что его годограф имеет минимальную длину в рассматриваемом диапазоне вращения оси.

Координаты x_n , y_n в этом случае можно считать координатами неподвижного вектора (назовем его средним осевым), относительно которого сумма квадратов координат годографа минимальная в заданном диапазоне вращения.

Понятия осевого и среднего осевого вектора оказались весьма удобными при построении геометрической модели монтировки, так как имеют ясный физический смысл и строгую математическую формулировку.

С другой стороны, годограф осевого вектора может служить целям диагностики погрешностей вращения, так как в силу своих свойств может указывать на типичные отклонения от идеального вращения, собранные, например, в специальном каталоге.

Заметим еще, что при стремлении рассматриваемого угла поворота оси к нулю годограф осевого вектора приближается к среднему осевому вектору и в пределе переходит в вектор, который в теоретической механике принято называть мгновенной осью вращения. Можно указать и на другие применения введенных здесь понятий осевых векторов. Вернемся, однако, к исследованиям на БТА.

Дальнейшая обработка полученных рядов Δx_i и Δy_i из разных циклов состояла в нахождении среднего ряда для осевого вектора и в анализе случайных отклонений от этого среднего. Результаты вычислений показали, что «среднее движение» осевого вектора находится в пределах 5 угл. с при ср. кв. отклонении от средней траектории около 1.1'' (рис. 2). Поскольку ошибка измерений координат u оценивается величиной 0.5'', можно считать, что случайные биения второй оси в опорных подшипниках в среднем составляют 1.0''.

Сравнение координат среднего осевого вектора показало, что его ордината y_n (наклон оси) менялась от цикла к циклу в пределах от 12 до 28''. При этом ошибка определения наклона не превосходила 0.7'' при отклонении первой оси от вертикали 1''. Выяснилось, что источником этой нестабильности является неравенство температурных режимов стоек монтировки. Измерения температуры воздуха в стойках с помощью термографов в течение недели (ошибка изме-

рей не более 0.5°C) выявили наличие переменной разности температур, максимальное значение которой достигало 5°C , что соответствует изменению наклона $10''$. Этот факт привел к необходимости разработки специальной системы оперативного контроля изменений неперпендикулярности осей, принцип действия которой поясняет схема на рис. 3.

Постоянной линейной базой служат 9-метровые отрезки инварной проволоки. Один конец каждого отрезка закреплен на верхнем торце соответствующей стойки, сами проволоки протянуты по всей их длине, а постоянное натяжение обеспечено грузом, шарнирно закрепленным в нижней части каждой стойки. Удлинение стоек относительно инварной проволоки измеряется датчиками линейных перемещений с дистанционным съемом информации, чувствительным элементом которых служат вращающиеся потенциометры. Питание датчиков —

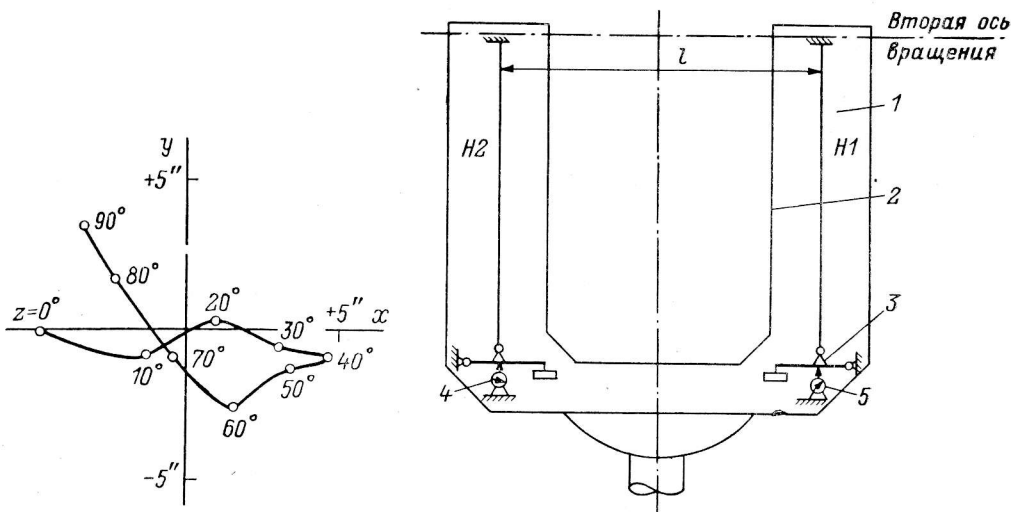


Рис. 2. График движения осевого вектора O второй оси вращения.

Рис. 3. Схема измерения температурных удлинений стоек БТА.

1 — стойка; 2 — инварная проволока; 3 — шарнирный рычаг; 4 — датчик № 9; 5 — датчик № 10.

от стабилизированного источника электроэнергии, а информативным сигналом является значение выходного напряжения, зависящее от положения измерительных штоков. Рабочий диапазон датчиков составляет 3 мм, ср. кв. ошибка измерения 0.01 мм. Конструкция датчиков разработана в ЦНИИГАиК.

Выходное напряжение от датчиков поступает в управляющую ЭВМ, где преобразуется в цифровую форму и по данным калибровки пересчитывается в линейное перемещение и затем в изменение неперпендикулярности ϕ . Расчетная погрешность $m_\phi = 0.6''$. Введение соответствующих поправок в наклон второй оси показало, что влияние других возможных источников изменения неперпендикулярности несущественно.

Проведенные исследования дают возможность контролировать влияние практически всех факторов, определяющих положение горизонтальной оси в процессе вращения. Главные результаты исследований заключаются в следующем.

1. Ср. кв. величина случайных биений в опорных подшипниках не превосходит 1 угл. с, что позволяет примерно с такой же точностью учитывать влияние систематических возмущений вращения, представленных годографом осевого вектора. Величины возмущений не превосходят 5 угл. с.

2. Обнаружена зависимость изменения взаимной неперпендикулярности осей вращения от разности температур стоек монтажки. Текущее значение неперпендикулярности наиболее просто получить с помощью системы оперативного измерения температурных удлинений стоек, позволяющей вводить соответствующие поправки со ср. кв. ошибкой не более $0.6''$.

Литература

1. В а й н б е р г В. Я. Исследование характеристик вращения и стабильности положения 1-й (вертикальной) оси БТА // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1985. 19. С. 82—87.
2. П о д о б е д В. В. Фундаментальная астрометрия. М.: Физматгиз, 1962. С. 92—93.
3. Р и д М. А. Оптимизация и стабилизация изображения в многозеркальных телескопах // Оптические телескопы будущего / Пер. с англ.: Под ред. П. В. Щеглова. М.: Мир, 1983. С. 156—167.
4. Б е л е в и т и н А. Г., Г о р д о н Г. Г. Высокоточный автоколлиматор с ортогональными оптическими микрометрами // Геодезия и картография. 1972. № 9. С. 18—20.

Поступила в редакцию 25 сентября 1986 г.
