

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ВРАЩЕНИЯ И СТАБИЛЬНОСТИ ПОЛОЖЕНИЯ ПЕРВОЙ (ВЕРТИКАЛЬНОЙ) ОСИ БТА

В. Я. Вайнберг

В течение двух лет исследованы характеристики вращения вертикальной оси телескопа БТА. Сделан вывод о высоком уровне точности сборки и о температурных деформациях конструкции телескопа.

The rotation characteristics of the vertical axes of the 6-meter telescope have been investigated for two years. A conclusion has been drawn about the high level of the amounting accuracy and temperature deformations of the telescope design.

С 1980 г. Центральный ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт геодезии, аэросъемки и картографии им. Ф. Н. Красовского (ЦНИИГАиК) совместно со службой эксплуатации САО ведет работы по исследованию ошибок наведения и ведения Большого азимутального телескопа. Целью проводимых исследований является разработка алгоритма и специальной программы для ЭВМ, управляющей телескопом с учетом необходимых поправок. Эти поправки должны компенсировать погрешности в положении визирной оси, вызываемые неизбежными ошибками изготовления и сборки телескопа, весовыми деформациями элементов монтировки, ошибками угломерных датчиков.

Одним из этапов этой работы было исследование характеристик вращения первой (вертикальной) оси телескопа и стабильности ее положения во времени. Полученные результаты, как нам кажется, представляют интерес как для специалистов, эксплуатирующих БТА, так и для разработчиков этой и будущих конструкций.

Кроме общего (среднего) наклона оси монтировки искомыми характеристиками вращения являлись систематические, т. е. поддающиеся последующему учету, и случайные колебания вала оси в подшипниках вращения. Общая методика исследования заключалась в измерении угловых колебаний некоторого вектора, жестко связанного с валом оси, при вращении всей монтировки по азимуту. Значительные размеры БТА предполагают также возможность изгибающих деформаций вала оси. Поэтому для их обнаружения были заданы три вектора на разных горизонтах, как показано на рис. 1: вектор O_{Π} — у пяты ориентирующего хвостовика; вектор O_{σ} — на стойках трубы; в качестве третьего вектора R использована визирная ось трубы телескопа.

Реализация векторов O_{Π} и O_{σ} выполнена парами взаимно перпендикулярных высокоточных ампульных цилиндрических уровней с ценой деления $\sim 2''$, жестко скрепленных с конструкцией телескопа. Нормаль к плоскости, параллельной осям уровней, и задает необходимый вектор. Для увеличения точности измерения колебаний O_{Π} и O_{σ} на пяте хвостовика закреплена еще одна пара уровней того же порядка точности, а на стойке *H-2* в дополнение к ампульным уровням на стойке *H-1* установлены два датчика электронного уровня индукционного типа с ценой деления $\sim 0''5$.

Один из каждой пары уровней ориентирован параллельно плоскости вращения трубы, другой — параллельно второй (горизонтальной) оси вращения телескопа.

Для реализации вектора R в точке *C* пересечения оси подшипника компенсатора вращения поля зрения с фокальной плоскостью главного зеркала было установлено подсвеченное перекрестие. На наружном кожухе кабины наблюдателя укрепили искусственный горизонт (*ГИ*). Нормаль *N* к свободно вися-

щему плоскому зеркалу *ГИ* задает отвесную линию с погрешностью $< 0''.3$. На том же кожухе закрепили двухкоординатный измерительный автоколлиматор (*ИК*) с ценой деления микрометров $\sim 2''$. Коллиматор установлен так, чтобы при отвесном положении трубы телескопа можно было измерять составляющие угла между *R* и *N* в плоскости вращения трубы и в перпендикулярной к ней плоскости. Таким образом, принятая ориентировка уровней и *ИК* поз-

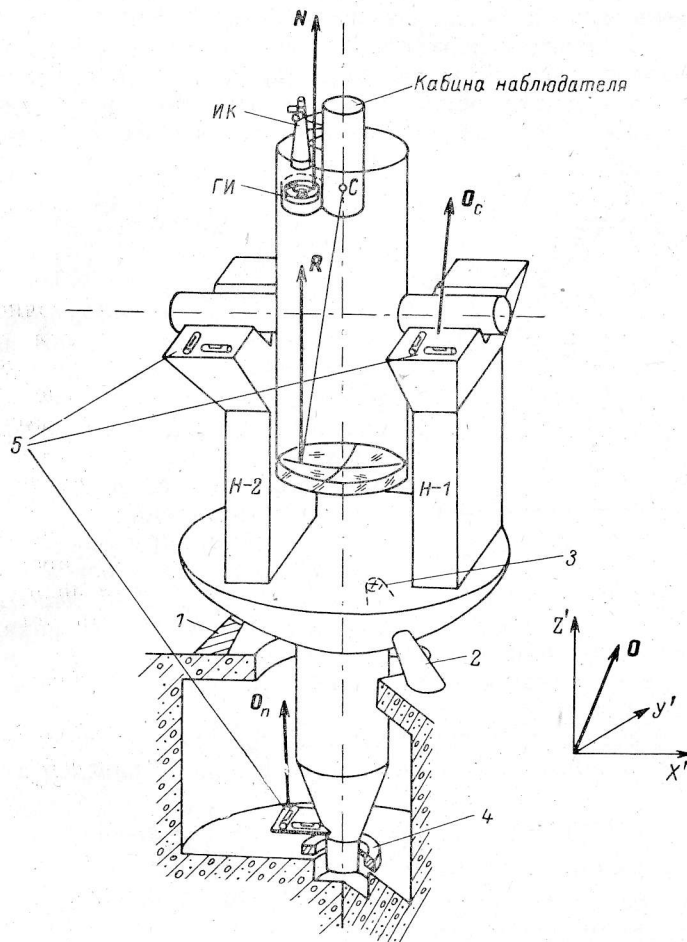


Рис. 1. Схема установки измерительной аппаратуры.

ИК — измерительный автоколлиматор; *ГИ* — искусственный горизонт; 1, 2, 3 — гидростатические опоры; 4 — ориентирующий подшипник; 5 — пары цилиндрических уровней.

воляли измерять малые углы x'_i и y'_i между каждым из векторов O_n , O_c и *R* (назовем их осевыми) и вертикальными плоскостями $Y'Z'$ и $X'Z'$ правой системы координат, показанной на рис. 1 (ось Z' направлена в зенит, ось X' лежит в вертикальной плоскости, параллельной второй оси телескопа, и направлена от стойки *H-2* к стойке *H-1*). Здесь i — номер установки телескопа в процессе измерений ($i=0, 1, 2, \dots, 23$).

Измерение углов наклона осевых векторов выполнялось в диапазоне поворота по азимуту (A) от -180 до $+180^\circ$ с шагом 15° в прямом и обратном направлениях, что составляло один цикл измерений. В сентябре 1981 г. был выполнен один цикл измерений одновременно для всех векторов, в апреле и июле 1980 г. — по одному циклу для векторов O_n и O_c и в июне и в марте 1981 г. — по одному циклу для вектора O_c .

Для каждого цикла по измеренным величинам были вычислены координаты x_i и y_i осевого вектора в неподвижной (правой) системе координат XYZ , у которой ось Z — вертикальна, ось Y — направлена на юг. Обе системы совпадают в момент, когда азимут A трубы телескопа равен нулю.

Понятно, что график изменения координат осевого вектора, т. е. его годограф, представляет собой замкнутую кривую, которую можно представить как результат сложения двух движений; а) вращения (с начальной фазой $\bar{\alpha}_0$) среднего радиуса годографа \bar{r} вокруг некоторого центра ($x_{\text{ц}}$ и $y_{\text{ц}}$) и б) малых относительно \bar{r} смещений l центра вращения, приводящих к смещению точек окружности на величины Δx_i и Δy_i (рис. 2).

Поставим себе задачей отыскание величин $x_{\text{ц}}$, $y_{\text{ц}}$, $\bar{\alpha}_0$, \bar{r} , а также смещений Δx_i и Δy_i , соответствующих полученным постоянным. Понятно, что без введения дополнительных условий задача решения не имеет,* так как число неизвестных всегда на 4 больше числа измерений. Поэтому потребуем, чтобы при найденных значениях выполнялось условие

$$\sum_i \Delta x_i^2 + \sum_i \Delta y_i^2 = \min. \quad (1)$$

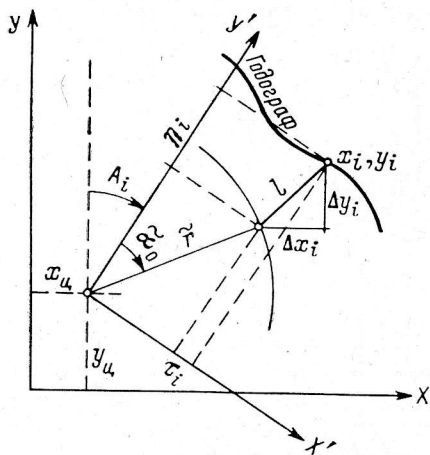


Рис. 2.

Этого оказывается достаточно, чтобы свести решение поставленной задачи к аппроксимации годографа окружностью, разделенной на равные промежутки, соответствующие шагу измерений. Координаты $x_{\text{ц}}$, $y_{\text{ц}}$ в этом случае будут представлять собой составляющие среднего в смысле (1) наклона оси, а разность координат меток окружности и точек годографа (Δx_i , Δy_i) назовем возмущениями вращения. Для использования результатов исследования понадобятся также проекции возмущений на оси X' и Y' системы, связанной с характерными плоскостями телескопа (как указано выше). Эти проекции (обозначим их τ и η) назовем биениями оси.

Если, как в нашем случае, шаг измерений постоянен и равен $2\pi/n$ и $\bar{r}/l \gg 1$, формулы аппроксимации достаточно просты, поэтому приведем их без вывода.

$$x_{\text{ц}} = \bar{x}_0 = \frac{1}{n} \sum_i x_i; \quad y_{\text{ц}} = \bar{y}_0 = \frac{1}{n} \sum_i y_i.$$

Чтобы не вводить новых обозначений, будем теперь считать x_i и y_i , а также x'_i и y'_i координатами точек годографа в системе X, Y (X', Y'), отнесенной к его центру. Тогда

$$\operatorname{tg} \bar{\alpha}_0 = \bar{y}_0 / \bar{x}_0, \quad \bar{r} = \bar{x}_0 \operatorname{cosec} \bar{\alpha}_0 = \bar{y}_0 \operatorname{sec} \bar{\alpha}_0 = \sqrt{\bar{x}_0^2 + \bar{y}_0^2},$$

где $\bar{x}_0 = \frac{1}{n} \sum_i x'_i$, $\bar{y}_0 = \frac{1}{n} \sum_i y'_i$, а

$$x'_i = x_i \cos A_i - y_i \sin A_i; \quad y'_i = x_i \sin A_i + y_i \cos A_i.$$

Биения

$$\tau_i = x'_i - \bar{x}_0; \quad \eta_i = y'_i - \bar{y}_0,$$

а возмущения вращения

$$\Delta x_i = \tau_i \cos A_i + \eta_i \sin A_i; \quad \Delta y_i = -\tau_i \sin A_i + \eta_i \cos A_i.$$

Здесь, как и раньше, A — азимут трубы телескопа в момент измерения с номером i , он же угол между осями Y и Y' , считая его положительным по ходу часовой стрелки; τ , η — биения оси в плоскости стоек и в плоскости вращения трубы. Значения $\bar{\alpha}_0$ и \bar{r}_0 в дальнейшем не используются и вычисляются для контроля положения измерительных приборов. Наибольший интерес представляют, конечно, $x_{\text{ц}}$, $y_{\text{ц}}$ и погрешности вращения. Заметим, что определенные по приве-

* Подобед В. В. Фундаментальная астрометрия. М.: Физматгиз, 1962.

денным формулам погрешности не зависят от начальной фазы $\bar{\alpha}_0$ осевого вектора и угла l между «средней» осью и осевым вектором, тогда как форма графика существенно меняется с изменением $\bar{\alpha}_0$ и \bar{r} . Значит, пользуясь рядами τ и η , можно сравнивать измерения, сделанные разными инструментами и в разное время, причем повторяющиеся величины в рядах естественно отнести к конструктивным особенностям осевой системы, а случайные части являются следствием как случайных погрешностей вращения, так и ошибок измерений.

Дальнейшая обработка рядов τ и η из разных циклов состояла в нахождении среднего ряда для данного осевого вектора и в анализе случайных отклонений от этого среднего. Указанный статистический анализ был выполнен только для осевых векторов O_{II} и O_c , так как для вектора R имелся только один цикл измере-

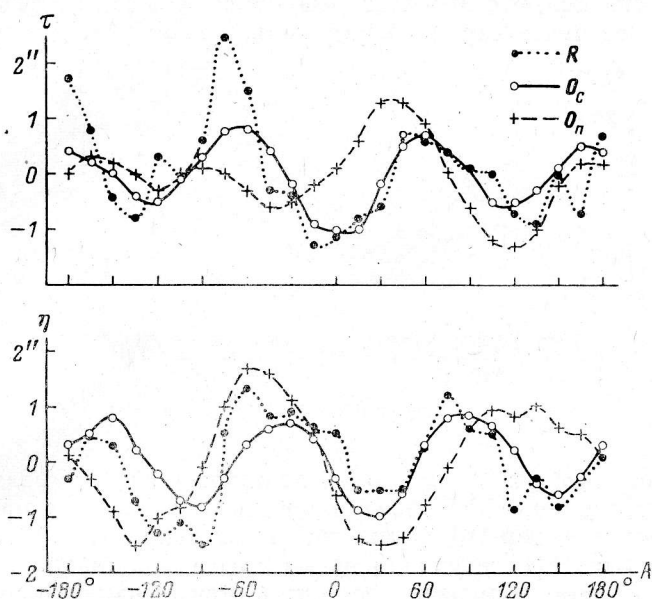


Рис. 3. Графики τ и η .

ний. Полученная выборка из 350 измерений характеризуется ср. кв. отклонением $\sigma=0^{\circ}22$ и математическим ожиданием, равным $+0^{\circ}002$. Распределение достаточно близко к нормальному закону, что было проверено по критерию Пирсона ($p=0.85$ при $x^2=7.07$ и $r=12$). Однако априорно известно, что ср. кв. ошибка (m) измерения X и Y при помощи установленных уровней приблизительно равна $0^{\circ}15-0^{\circ}2$. Понятно, что m входит в σ . Поэтому из полученного значения $\sigma=0^{\circ}22$ нельзя достоверно выделить случайную погрешность колебаний вала оси, иначе, биений в подшипниках. Следует считать, что биения в данных измерениях не проявляются, так как не превосходят в среднем $0^{\circ}1$.

На рис. 3 приведены графики средних τ и η для осевых векторов O_{II} , O_c и R .

Смещение фазы и переменный характер разностей амплитуд колебаний пяты и стоек свидетельствуют о переменном по азимуту прогибе вала оси на участке пяты—стойка. Последующие измерения в апреле 1982 г. показали, что эти деформации относятся к более короткому отрезку оси — ориентирующему хвостовику на участке от опорной сферы до пяты. Заметно также, что наиболее близким по поведению к вектору визирной оси R является вектор O_c . Поэтому при разработке программы учета геометрических ошибок телескопа допустимо использовать значения биений первой оси, полученные по измерениям вектора O_c .

Графики колебаний, вычисленные по измерениям O_c , носят отчетливый периодический характер с периодом $2\pi/3$ и двойной амплитудой $\sim 1^{\circ}4$ для каждой из составляющих. Разность фаз τ и η равна $\pi/6$. Можно показать, что такая картина соответствует движению вектора, жестко связанного со сферой, скользящей по трем неподвижным опорам, в том случае, если сфера имеет за-

метную эллипсоидальность. (Среднее положение вектора должно быть перпендикулярно к плоскости опор).

Действительно, соответствующие этому случаю зависимости τ и η от A имеют вид (вывод опускаем):

$$\tau = -kr \cos 3A; \quad \eta = kr \sin 3A,$$

где ρ — отношение разности полуосей к большей полуоси сфероида (сжатие); k — конструктивный параметр.

Для значений $\tau = \eta = 1''4$, полученных для O_c , величина разности полуосей оказалась равной 0.12 мм при радиусе опорной сферы $3.3 \cdot 10^3$ мм и расстоянии ее от пяты до плоскости опор $10.4 \cdot 10^3$ мм.

Выше было сказано, что кроме погрешностей вращения в задачу исследований входило определение параметров стабильности положения первой оси ($x_{ц}$ и

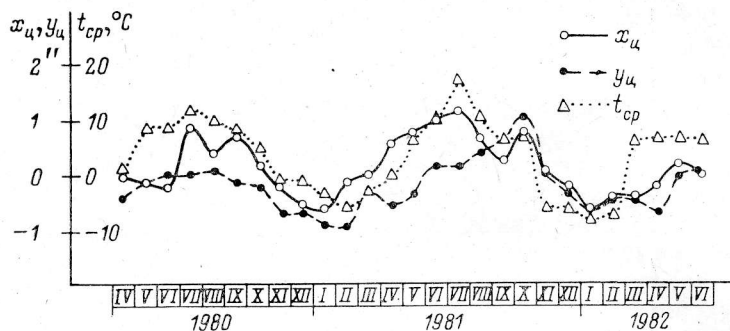


Рис. 4. График положения первой оси.

$y_{ц}$) относительно отвесной линии. С этой целью начиная с апреля 1980 г. были организованы регулярные наблюдения по уровням на пяте ориентирующего хвостовика (осевой вектор $O_{п}$). Измерения по методике ЦНИИГАиК выполняются сотрудниками САО с периодичностью 2 раза, а с января 1981 г. — 1 раз в месяц. Каждый цикл измерений состоит в отсчитывании по уровням углов x' и y' на четырех установках по азимуту: -180 , -90 , 0 и $+90^\circ$. Выбор такой сокращенной методики определения $x_{ц}$ и $y_{ц}$ сделан на основании рядов τ и η для $O_{п}$, который показал, что ошибка положения центра в этом случае не превосходит $0''2$, т. е. лежит в обычных пределах.

Результаты наблюдений стабильности положения за период до 18 июня 1982 г. представлены графиками на рис. 4. На них виден отчетливый сезонный ход положения оси. При последующем анализе была сделана попытка увязать полученные значения $x_{ц}$ и $y_{ц}$ с температурой воздуха. В обработку бралась средняя температура 4-суточного интервала, предшествовавшего наблюдениям. Полученные значения коэффициентов корреляции оказались равными $+0.6 \pm +0.07$ и $+0.7 \pm 0.11$ для $x_{ц}$ и $y_{ц}$ соответственно. Это позволяет предположить, что температура воздуха — один из главных факторов изменения положения первой оси.

Таким образом, исследования характеристик первой оси БТА и выполненные за период с апреля 1980 г. по июнь 1982 г. наблюдения за ее положением позволяют сделать следующие выводы.

1. Изготовление и сборка оси выполнены на исключительно высоком уровне точности. Об этом свидетельствуют исчезающие малые случайные биения (порядка $0''4$) и рассчитанная эллиптичность опорной сферы, равная ~ 0.1 мм.

2. Указанная эллиптичность приводит к систематическим угловым колебаниям монтировки с амплитудой $\sim 1''4$, а их периодический характер позволяет выполнить аппроксимацию функции поправок первыми членами тригонометрического ряда и таким образом учесть возникающие наклоны всей монтировки в процессе наблюдений с точностью $0''2-0''3$.

3. Ход отклонения среднего положения оси от отвесной линии имеет отчетливо выраженную сезонную зависимость и хорошо коррелирует с изменением средней температуры в интервале 4 суток, предшествовавших наблюдению.

Сезонные изменения положения оси лежат в пределах $-1''6-0''6$ в плоскости меридиана и $-0''7-1''3$ в плоскости первого вертикала. Достаточная тесная связь положения первой оси и температуры наружного воздуха позволяет предположить, что причиной сезонного изменения наклона всей монтировки являются температурные деформации опорных конструкций телескопа.

Хотя объем выполненных измерений позволяет прогнозировать температурные влияния на положение первой оси, все же необходимы регулярные непосредственные определения ее положения не реже 1 раза в месяц для учета других возможных источников наклона монтировки.

Поступила в редакцию 28 октября 1982 г.
