

АНАЛИЗ ОШИБОК МАКЕТА БОЛЬШОГО ТЕЛЕСКОПА НА АЛЬТАЗИМУТАЛЬНОЙ МОНТИРОВКЕ

С. М. Виленчик, Я. Б. Вятский, А. С. Найшуль,
Е. М. Неплохов

Приводится расчет ошибок программного наведения макета Большого телескопа и дается сравнительная оценка результатов расчета и эксперимента.

A calculation of program setting errors of the scale model of the Big Telescope on an altazimuth mounting is presented. A comparison estimate is given of results of the calculation and of an experiment.

Ленинградским оптико-механическим объединением проведено исследование комплекса макета Большого телескопа (МБТ), установленного в Пулковке. Вопросы синтеза и анализа комплекса управления оптическим телескопом на альтазимутальной монтировке рассматривались в [1—6],

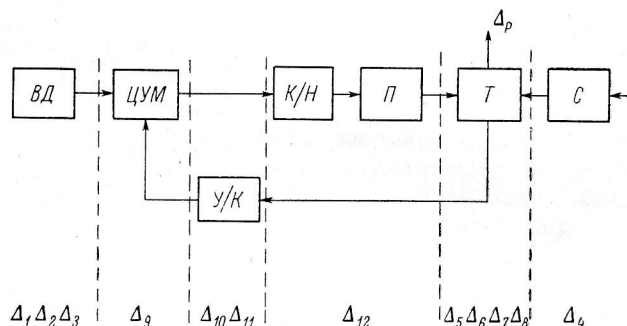


Рис. 1. Схема программного наведения МБТ.

ВД — входные данные, ЦУМ — цифровая управляющая машина, К/Н — преобразователи «код—напряжение», П — электрический привод, Т — телескоп МБТ, У/К — преобразователь «угол—код», С — среда распространения сигнала, $\Delta_1 \dots \Delta_{12}$ — составляющие ошибки элементов САУ, Δ_p — результирующая ошибка программного наведения.

в [7] приведены описание МБТ, организация управления макетом и первые практические результаты работы комплекса.

В предлагаемой статье проводится анализ ошибок комплекса и сопоставляются экспериментальные данные с предварительно рассчитанной ошибкой программного наведения МБТ.

На рис. 1 представлена схема программного наведения МБТ. Среда распространения сигнала, элементы системы программного наведения и сам инструмент являются источниками ошибок, которые, согласно [4],

можно разделить на астрономические, инструментальные и ошибки цифровой системы автоматического управления (САУ). Рассмотрим каждую из них в системе координат: азимут (A)—зенитное расстояние (z), соответствующей монтажке телескопа.

АСТРОНОМИЧЕСКИЕ ОШИБКИ

1. Ошибки, вызванные неточностью определения координат астропункта телескопа (широты φ и долготы λ):

$$\Delta_1 A = \frac{\partial A}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial A}{\partial \lambda} \Delta \lambda,$$

$$\Delta_1 z = \frac{\partial z}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial z}{\partial \lambda} \Delta \lambda,$$

где, согласно [8], $\frac{\partial A}{\partial \varphi} = -\sin A \operatorname{ctg} z$, $\frac{\partial A}{\partial \lambda} = \frac{\cos \delta \cos q}{\sin z}$, $\frac{\partial z}{\partial \varphi} = \cos A$, $\frac{\partial z}{\partial \lambda} = \cos \varphi \sin A$; поскольку $t = S + \lambda - \alpha$, то $\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial A}{\partial S} = \frac{\partial A}{\partial \lambda} = \frac{\partial A}{\partial \alpha}$; $\frac{\partial z}{\partial t} = \frac{\partial z}{\partial S} = \frac{\partial z}{\partial \lambda} = \frac{\partial z}{\partial \alpha}$; здесь S — звездное время, t — часовой угол, α — прямое восхождение, δ — склонение, q — параллактический угол наблюдаемого небесного тела. Координаты астропункта МБТ были определены с ошибкой: $\Delta \varphi = 0''.3$, $\Delta \lambda = 0''.03$. Максимальные значения частных производных в рабочей зоне наблюдения составляют: $\frac{\partial A}{\partial \varphi} = 11.4$, $\frac{\partial A}{\partial \lambda} = 6.7$, $\frac{\partial z}{\partial \varphi} = 1$, $\frac{\partial z}{\partial \lambda} = 0.5$. Отсюда максимальные значения ошибок будут: $\max \Delta_1 A = 6''.42$, $\max \Delta_1 z = 0''.52$.

2. Ошибки, вызванные неточностью выработки звездного времени S :

$$\Delta_2 A = \frac{\partial A}{\partial S} \Delta S,$$

$$\Delta_2 z = \frac{\partial z}{\partial S} \Delta S.$$

Ошибка задания звездного времени $\Delta S = 0''.01$, а максимальные значения частных производных $\frac{\partial A}{\partial S} = 6.7$, $\frac{\partial z}{\partial S} = 0.5$. Отсюда $\max \Delta_2 A = 0''.067$, $\max \Delta_2 z = 0''.005$.

3. Ошибки задания координат небесного тела (прямого восхождения α и склонения δ):

$$\Delta_3 A = \frac{\partial A}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial A}{\partial \delta} \Delta \delta,$$

$$\Delta_3 z = \frac{\partial z}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial z}{\partial \delta} \Delta \delta.$$

Ошибки задания прямого восхождения и склонения на МБТ составляют: $\Delta \alpha = 0''.02$, $\Delta \delta = 0''.1$, а максимальные значения частных производных: $\frac{\partial A}{\partial \alpha} = 6.7$, $\frac{\partial A}{\partial \delta} = 11.4$, $\frac{\partial z}{\partial \alpha} = 1$, $\frac{\partial z}{\partial \delta} = 1$. Отсюда $\max \Delta_3 A = 3''.25$, $\max \Delta_3 z = 0''.4$.

4. Ошибки, вызванные атмосферной рефракцией r . Согласно [8]:

$$\Delta_4 A = 0,$$

$$\Delta_4 z = r = 60'' \cdot 2 \frac{b}{760} \cdot \frac{273.2}{273.2 + a} \cdot \operatorname{tg} z,$$

где a — температура окружающей среды в °C, b — давление в мм рт. ст. Максимальное значение ошибки $\Delta_4 z$ при $a=20^\circ$ C, $b=760$ мм рт. ст. составляет $\max \Delta_4 z = 5'30''$.

Согласно рис. 1, ошибки $\Delta_1 A$, $\Delta_1 z$, $\Delta_2 A$, $\Delta_2 z$, $\Delta_3 A$, $\Delta_3 z$ относятся к ошибкам входных данных, а $\Delta_4 A$, $\Delta_4 z$ — к ошибкам, вызванным средой распространения оптического сигнала.

ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ ОШИБКИ

5. Ошибки, вызванные наклоном l горизонтальной оси монтировки телескопа:

$$\Delta_5 A = l \operatorname{ctg} z,$$

$$\Delta_5 z = \frac{l^2}{2} \operatorname{ctg} z.$$

Практически полученная на приборе величина l не превышает $2''$. Максимальные значения ошибок наклона составляют: $\max \Delta_5 A = 22''8$, $\max \Delta_5 z = 0''0012$.

6. Ошибки, вызванные коллимацией k :

$$\Delta_6 A = \frac{k}{\sin z},$$

$$\Delta_6 z = \frac{k^2}{2} \operatorname{ctg} z.$$

Практически полученная на макете величина коллимации k не превышает $2''$. Тогда максимальные значения ошибок от коллимации составляют: $\max \Delta_6 A = 22''8$, $\max \Delta_6 z = 0''0012$.

7. Ошибки, вызванные наклоном m вертикальной оси монтировки по отношению к истинной вертикали места. Известно [8], что ошибку наклона m можно разложить на составляющие по широте φ и долготе λ :

$$\Delta_7 \varphi = m \cos A_0,$$

$$\Delta_7 \lambda = m \frac{\sin A_0}{\cos \varphi},$$

где A_0 — азимут плоскости наклона вертикальной оси монтировки. Тогда выражения для ошибок азимута и зенитного расстояния примут вид:

$$\Delta_7 A = \frac{\partial A}{\partial \varphi} \Delta_7 \varphi + \frac{\partial A}{\partial \lambda} \Delta_7 \lambda,$$

$$\Delta_7 z = \frac{\partial z}{\partial \varphi} \Delta_7 \varphi + \frac{\partial z}{\partial \lambda} \Delta_7 \lambda.$$

Полученное в результате измерений значение m не превышает $30''$. Максимальные значения частных производных приведены выше. Максимальные значения ошибок из-за наклона вертикальной оси составляют при $A_0 = 45^\circ$ соответственно $\max \Delta_7 A = 8'20''$, $\max \Delta_7 z = 42''$.

8. Ошибки, вызванные гнутостью трубы d . Согласно [7]:

$$\Delta_8 A = 0,$$

$$\Delta_8 z = d \sin z,$$

где d — конструктивный коэффициент, определяемый жесткостью трубы телескопа. При малых размерах трубы МБТ практически $d=0$, т. е. $\Delta_8 z = 0$.

Согласно рис. 1, ошибки $\Delta_5 A$, $\Delta_5 z$, $\Delta_6 A$, $\Delta_6 z$, $\Delta_7 A$, $\Delta_7 z$, $\Delta_8 A$, $\Delta_8 z$ относятся к ошибкам телескопа.

ОШИБКИ ЦИФРОВОЙ САУ

9. Ошибки вычисления текущих координат, обусловленные разрядной сеткой машины и погрешностями вычислений:

$$\Delta_9 A = \Delta_9 z = \frac{1}{2} \cdot \frac{360}{2^N - 1},$$

где N — число разрядов преобразователя «угол—код». Максимальные значения ошибок для $N=19$ составят $\max \Delta_9 A = 1''25$, $\max \Delta_9 z = 1''25$.

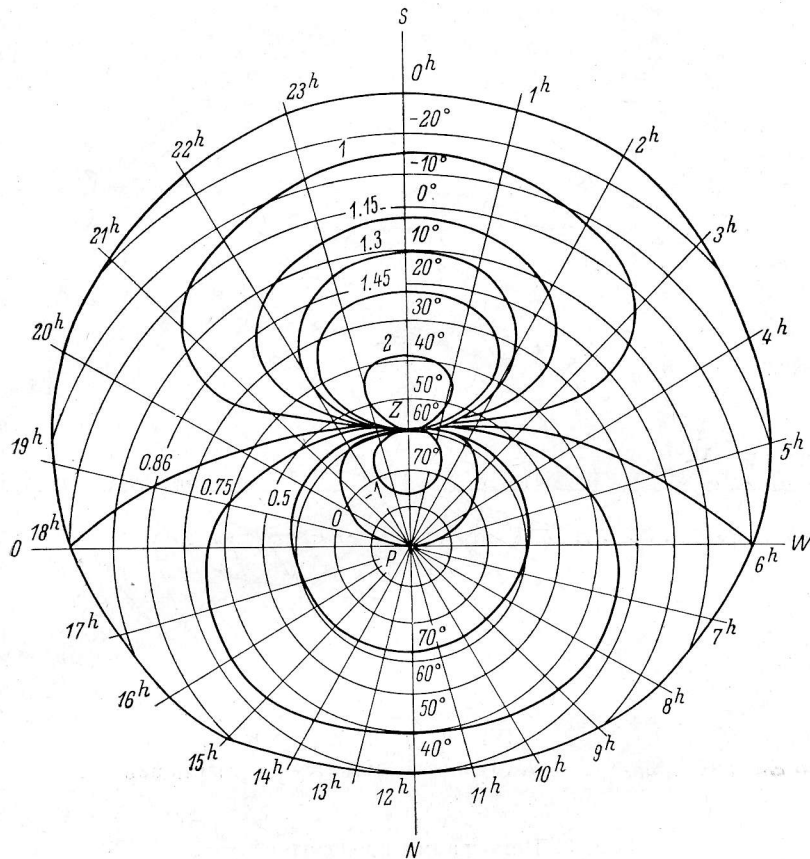


Рис. 2. Номограмма производной $\frac{\partial A}{\partial t}$.

10. Ошибки в отработке вычисленных координат, вызванные дискретностью датчика «угол—код»:

$$\Delta_{10} A = \Delta_{10} z = \frac{360}{2^N - 1}.$$

При $N=19$ максимальные значения ошибок составят $\max \Delta_{10} A = 2''5$, $\max \Delta_{10} z = 2''5$.

11. Ошибки, вызванные погрешностью кинематической схемы измерения.

Паспортные данные конечных отсчетных червячных пар таковы:

азимутальная пара

циклическая ошибка $\eta_A = 1''5$,

накопленная ошибка $\xi_A = 20''$,
 пара зенитного расстояния
 циклическая ошибка $\eta_z = 3''$,
 накопленная ошибка $\xi_z = 20''$.

Максимальные значения ошибок, вызванных схемой измерения
 $\max \Delta_{11}A = 20''$, $\max \Delta_{11}z = 20''$.

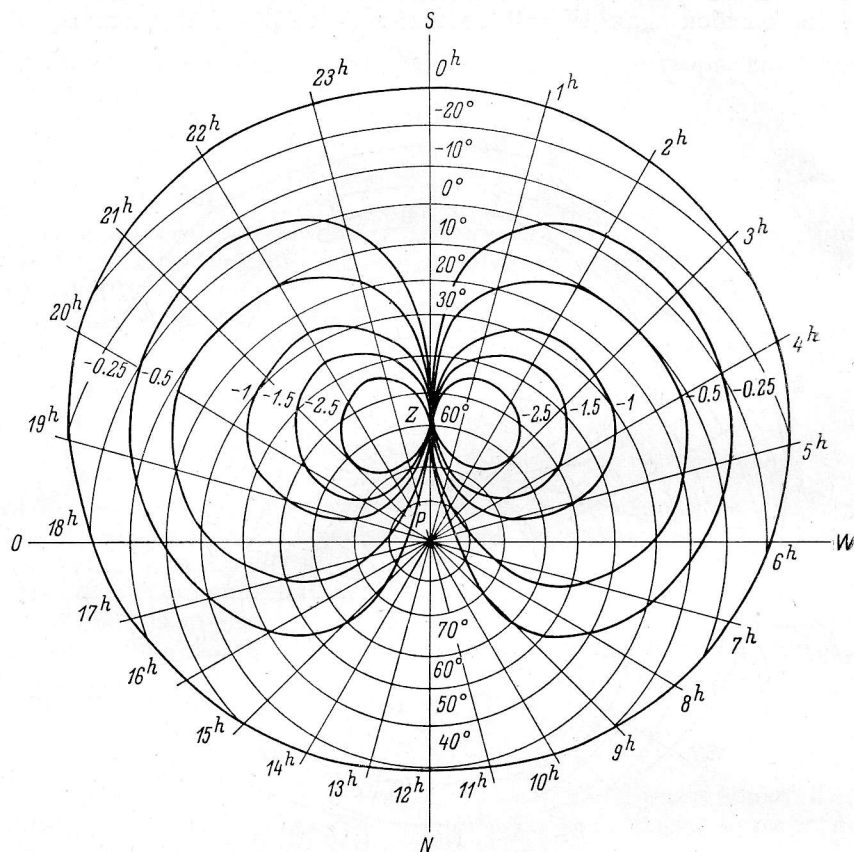


Рис. 3. Номограмма производной $\frac{\partial A}{\partial \varphi}$.

12. Ошибки системы, вызванные динамикой привода. Согласно [9]:

$$\Delta_{12}A = c_1^A \frac{\partial A}{\partial t} (nT) + \frac{c_2^A}{2!} \cdot \frac{d^2A}{dt^2} (nT) + \frac{c_3^A}{3!} \cdot \frac{d^3A}{dt^3} (nT) + \dots,$$

$$\Delta_{12}z = c_1^z \frac{dz}{dt} (nT) + \frac{c_2^z}{2!} \cdot \frac{d^2z}{dt^2} (nT) + \frac{c_3^z}{3!} \cdot \frac{d^3z}{dt^3} (nT) + \dots,$$

где c_i^A , c_i^z — коэффициенты ошибок систем азимута и зенита, определяемые параметрами цифровых САУ, $i=1, 2, 3, \dots, n=0, 1, 2$, T — период выдачи данных цифровой машиной.

Как показал расчет, при добротности каждой из систем $K_A = K = 3 \text{ сек.}^{-1}$ ряд ошибки сходится достаточно быстро, что позволяет ограничиться рассмотрением первых двух членов разложения. Согласно [8], $\max \frac{dA}{dt} = 120''/\text{сек.}$, $\max \frac{d^2A}{dt^2} = 0.075''/\text{сек.}^2$, $\max \frac{dz}{dt} = 15''/\text{сек.}$, $\max \frac{d^2z}{dt^2} = 0.009''/\text{сек.}^2$

ТАБЛИЦА 1
Ошибки макета БТА

Названия ошибок	Обозначения	Формула	Максимальное значение
Ошибки, вызванные неточностью определения φ и λ	$\Delta_1 A$	$\Delta_1 A = \frac{\partial A}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial A}{\partial \lambda} \Delta \lambda$	6"42
	$\Delta_1 z$	$\Delta_1 z = \frac{\partial z}{\partial \varphi} \Delta \varphi + \frac{\partial z}{\partial \lambda} \Delta \lambda$	0"52
Ошибки, вызванные неточностью выработки S	$\Delta_2 A$	$\Delta_2 A = \frac{\partial A}{\partial S} \Delta S$	0"067
	$\Delta_2 z$	$\Delta_2 z = \frac{\partial z}{\partial S} \Delta S$	0"005
Ошибки задания координат α , δ	$\Delta_3 A$	$\Delta_3 A = \frac{\partial A}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial A}{\partial \delta} \Delta \delta$	3"25
	$\Delta_3 z$	$\Delta_3 z = \frac{\partial z}{\partial \alpha} \Delta \alpha + \frac{\partial z}{\partial \delta} \Delta \delta$	0"4
Ошибки, вызванные атмосферной рефракцией r	$\Delta_4 A$	$\Delta_4 A = 0$	0
	$\Delta_4 z$	$\Delta_4 z = 60'2 \cdot \frac{b}{760} \cdot \frac{273.2}{273.2 + a} \operatorname{tg} z$	330
Ошибки из-за наклонности горизонтальной оси l	$\Delta_5 A$	$\Delta_5 A = l \operatorname{ctg} z$	22"8
	$\Delta_5 z$	$\Delta_5 z = \frac{1}{2} l^2 \operatorname{tg} z$	0"0012
Ошибки из-за коллимации k	$\Delta_6 A$	$\Delta_6 A = \frac{k}{\sin z}$	22"8
	$\Delta_6 z$	$\Delta_6 z = \frac{1}{2} k^2 \operatorname{tg} z$	0"0012
Ошибки из-за наклонности вертикальной оси m	$\Delta_7 A$	$\Delta_7 A = \frac{\partial A}{\partial \varphi} \Delta_7 \varphi + \frac{\partial A}{\partial \lambda} \Delta_7 \lambda$	500"
	$\Delta_7 z$	$\Delta_7 z = \frac{\partial z}{\partial \varphi} \Delta_7 \varphi + \frac{\partial z}{\partial \lambda} \Delta_7 \lambda$	42"
Ошибки из-за гнутя трубы d	$\Delta_8 A$	$\Delta_8 A = 0$	0
	$\Delta_8 z$	$\Delta_8 z = d \sin z$	0
Ошибки вычисления текущих координат	$\Delta_9 A$	$\Delta_9 A = \frac{1}{2} \cdot \frac{360^\circ}{2^N - 1}$	1"25
	$\Delta_9 z$	$\Delta_9 z = \frac{1}{2} \cdot \frac{360^\circ}{2^N - 1}$	1"25
Ошибки из-за дискретности датчика «угол—код»	$\Delta_{10} A$	$\Delta_{10} A = \frac{360^\circ}{2^N - 1}$	2"5
	$\Delta_{10} z$	$\Delta_{10} z = \frac{360^\circ}{2^N - 1}$	2"45
Ошибки из-за погрешности кинематической схемы измерения	$\Delta_{11} A$	—	20"
	$\Delta_{11} z$	—	20"

Названия ошибок	Обозначения	Формулы	Максимальные значения
Ошибки системы, вызванные динамикой привода	$\Delta_{12}A$	$\Delta_{12}A = c_1^A \frac{dA}{dt} (nT) + \frac{c_2^A}{2!} \cdot \frac{d^2A}{dt^2} (nT) + \dots$	1'25
	$\Delta_{12}z$	$\Delta_{12}z = c_1^z \frac{dz}{dt} (nT) + \frac{c_2^z}{2!} \cdot \frac{d^2z}{dt^2} (nT) + \dots$	1'25

Максимальные ошибки цифровых систем азимута и зенитного расстояния соответственно равны: $\max \Delta_{12}A = 1'25$, $\max \Delta_{12}z = 1'25$.

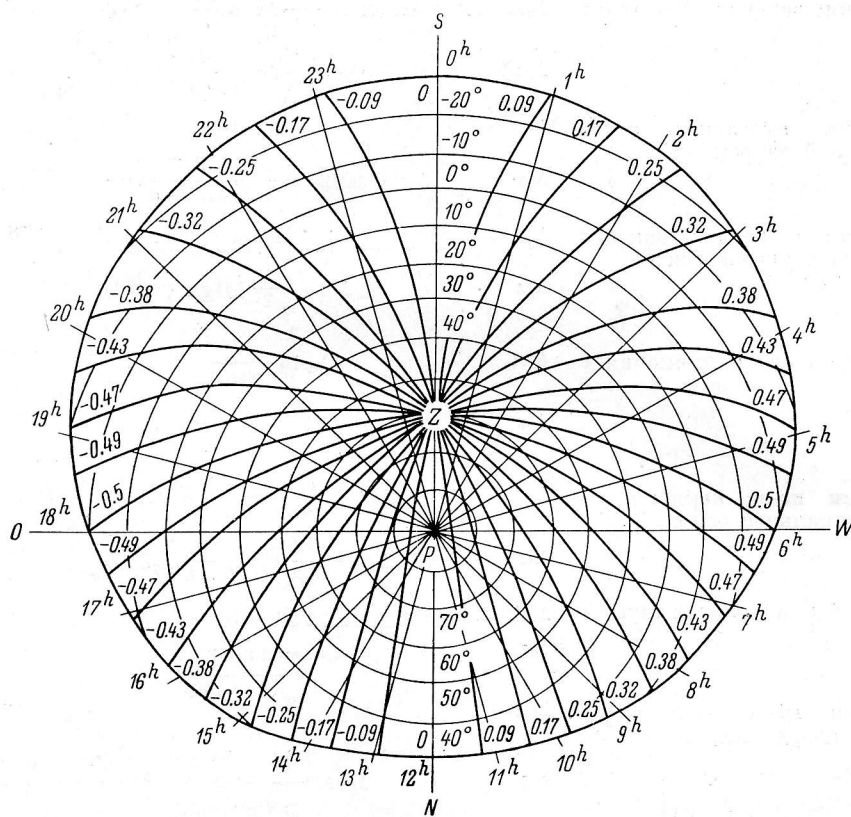


Рис. 4. Номограмма производной $\frac{\partial z}{\partial t}$.

Согласно рис. 1, ошибки Δ_9A , Δ_9z относятся к ошибкам ЭЦУМ, $\Delta_{10}A$, $\Delta_{10}z$, $\Delta_{11}A$, $\Delta_{11}z$ — к ошибкам преобразователя «угол—код», $\Delta_{12}A$, $\Delta_{12}z$ — к ошибкам приводов.

Полученные выше результаты сведены в табл. 1.

Для определения точности программного наведения был проведен эксперимент, описанный в [7]. В ЭЦУМ вводились координаты звезд в различных участках неба. Ошибка наведения считывалась в фокусе Нэсмита по смещению оптического изображения звезды относительно центра поля зрения.

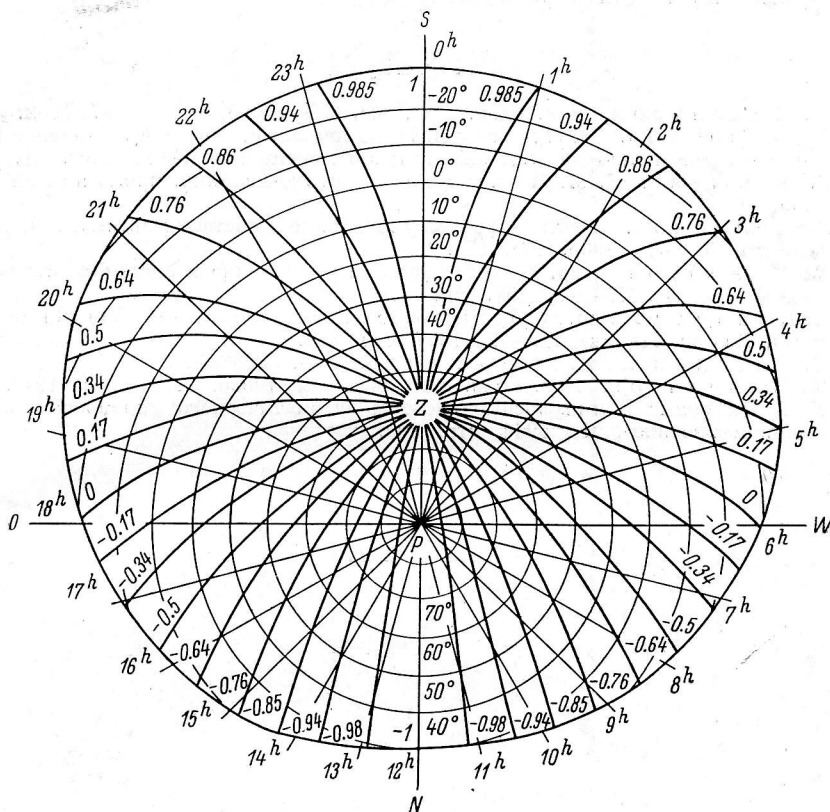


Рис. 5. Номограмма производной $\frac{\partial z}{\partial \varphi}$.

Для каждой из звезд рассчитывались ошибки согласно приведенному выше анализу. Для облегчения расчета были составлены номограммы производных $\frac{\partial A}{\partial t}$, $\frac{\partial A}{\partial \varphi}$, $\frac{\partial z}{\partial t}$ и $\frac{\partial z}{\partial \varphi}$ в координатах t и δ . Номограммы приведены на рис. 2, 3, 4, 5. Результаты проделанного расчета сведены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 2

Расчетные и экспериментальные значения ошибок (в сек. дуги)

Ошибки	α Лебеда $t = 1^{\text{h}}24^{\text{m}}$ $\delta = 45^{\circ}10'17''$	β Пергаса $t = 0^{\text{h}}13^{\text{m}}$ $\delta = 27^{\circ}54'06''$	α Кассиопеи $t = 1^{\text{h}}08^{\text{m}}$ $\delta = 56^{\circ}22'31''$	α Возничего $t = 22^{\text{h}}$ $\delta = 45^{\circ}58'21''$
max ΔA	142	97	185	130
ΔA (эксперимент)	64	91	280	68
max Δz	63	73	49	76
Δz (эксперимент)	32	64	24	48

Как можно видеть, расчетные значения максимальных возможных ошибок близки к экспериментально полученным результатам. Таким образом, можно считать, что приведенный выше анализ позволяет с достаточной точностью оценивать ошибки программного наведения МБТ.

Подобная методика оценки ошибок программного наведения может быть применена и для телескопа БТА.

Литература

1. Н. Н. Михельсон, Изв. Глав. астр. obs. в Пулковe, № 169, 167, 1962.
2. Е. М. Неплохов. Вопросы синтеза систем автоматического управления оптическим телескопом на альтазимутальной монтировке. Канд. дисс. Л., 1966.
3. А. С. Найшуль, Е. М. Неплохов, Оптико-механич. промышл., № 9, 20, 1966.
4. Е. М. Неплохов. В сб.: Цифровое управление в системах автоматизации, Изд-во «Наука», М.—Л., 1968, стр. 173.
5. Е. М. Неплохов и др. В сб.: Цифровое управление в системах автоматизации, Изд-во «Наука», М.—Л., 1968, стр. 73.
6. Е. М. Неплохов и др. В сб.: Цифровые системы управления точными механизмами, Изд-во «Наука», М.—Л., 1967, стр. 125.
7. Я. Б. Вятский и др., Астрофиз. исслед. (Изв. САО), 3, 20, 1971.
8. Н. Н. Михельсон, Изв. Глав. астр. obs. в Пулковe, № 185, 100, 1970.
9. Т. Гу. Цифровые и импульсные системы автоматического управления. Изд-во «Машиностроение», М., 1964, стр. 299.

Ноябрь 1970 г.