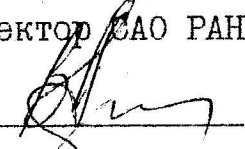


Приведен анализ состояния юстировки, стабильности положения главного зеркала, прямых измерений геометрии телескопа и многолетних рядов ошибок наведения БТА. Сделан вывод о высокой точности и стабильности параметров геометрии БТА, дающий высокую оценку качеству основных узлов и механизмов БТА (за исключением механизма автоматической балансировки трубы).

Предложен простой программный алгоритм исключения ошибок наведения для новой АСУ БТА, реализуемый сейчас на БТА. Алгоритм обеспечивает точность наведения $\sigma \leq 3''$ на протяжении ряда лет, с возможностью сведения ошибки наведения до уровня $\sigma \leq 1.5''$ в данную ночь. При этом исключаются накопленные ошибки ведения.

Специальная Астрофизическая Обсерватория
Российской Академии наук

УТВЕРЖДАЮ
Директор САО РАН


Д.Ф.-м.н. Афанасьев В.Л.
" 11 " марта 1993 г.

О Т Ч Е Т

Точностные характеристики наведения БТА

Исполнители:

в.н.с. Снежко Л.И.

м.н.с. Шагошева З.У.

пос. Нижний Архыз

1993 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	1.
I. Проблема стабильности положения главного зеркала БТА.....	2.
I.1. Совмещение оптического центра с центром поля ПФ БТА.	
I.2. Стабильность положения главного зеркала в оправе.	
2. Результаты прямых измерений геометрии БТА.....	15.
3. Анализ полей ошибок наведения БТА.....	17.
3.1. Стабильность параметров средней геометрии БТА.	
3.2. Гнутая труба и стабильность Z-составляющей.	
3.3. Ошибки часового угла.	
4. Процедура исключения ошибок наведения БТА.....	37.
4.1. Иллюстрация эффективности системы поправок.	
4.2. Алгоритмы программного исключения ошибок наведения.	
4.3. Исключение накопленных ошибок ведения.	
5. Заключение.....	46.
Литература.....	47.
Приложение I: Поля ошибок наведения БТА и полученные из них параметры поправок.	
Приложение 2: программы анализа полей ошибок наведения.	

Задача "повышения точности наведения" включает в себя кроме очевидного - минимизации ошибок наведения, и менее очевидный аспект - минимизацию накопленных ошибок ведения. Реальная система телескопа (ось высот, вертикальная ось, визирная ось трубы и т.д.) не совпадает с идеальной, в которой задается программное ведение, поэтому возникает тренды ошибок ведения, включающие эффекты вращения поля при наблюдениях фактически внеосевого объекта. Автоматическое или полуавтоматическое (ручное) гидирование приводит к работе управления в режиме переходных процессов, в которых возбуждается весь спектр короткопериодических колебаний изображения. Таким образом, полное устранение всех систематических ошибок наведения является обязательным для реализации проникающей силы телескопа.

В Техническом Задании на телескоп БТА, разработанном с участием группы пулковских астрономов, были сформулированы следующие точностные требования:

- точность наведения $\pm 15''$ по обеим осям;
- накопленная ошибка программного ведения не должна превышать $5''$ за 5 мин. экспозиции.

При этом сам процесс отслеживания положения объекта предполагалось возложить на фотогидирование с отдельными приводами. И хотя телескоп БТА принимался в эксплуатацию в 1975 году по требованиям ТЗ, даже эти очень слабые требования удалось выполнить только в 1985 году. Реализованная на отдельном телескопе-гиде идея фотогида не оправдала себя как из-за низкой проникающей силы, так и из-за нерешенности проблем компенсации вращения полей и дифференциальных гнущий (достаточно эффективно работал только местный фотогид ОЗСП).

Первый опыт программной компенсации ошибок геометрии телескопа, успешно выполненной на англо-австралийском телескопе [I], широко обсуждался в САО. В табл. I приведены точностные характеристики, заложенные в проекты действующих и строящихся телескопов (σ - среднеквадратичные ошибки наведения, Δ - накопленные ошибки ведения за 30 мин., δ - амплитуда высокочастотных ошибок ведения).

Впечатляющие результаты по разрешению и проникающей силе, уже полученные на телескопе новой технологии ESO, показывают, что эти требования выполнены. Именно эта высокая точность ведения и наведения создает базу, на которой успешно разрабатываются и применяются методы активной оптики, позволившие достичь разрешения космических телескопов.

Таблица I. Точностные характеристики проектов новых телескопов.

Телескоп	σ	Δ	δ
NTT ESO [2]	$\pm 1''$	$< 0.3''$	$< 0.1''$
8-м VLT ESO [3]	$\pm 1''$	-	$< 0.05''$
7.5-м JNLT [3]	$\pm 1''$	-	$< 0.2''$
10-м субмм. [4] телескоп	$\pm 1''$	-	$< 0.2''$

Учитывая опыт исследований БТА, повышенные точностные характеристики включены в проект новой АСУ БТА [6]. Этому требуют как новые методы получения прямых изображений с высоким пространственным разрешением, так и новые спектральные методы для слабых объектов, реализованные сейчас на БТА.

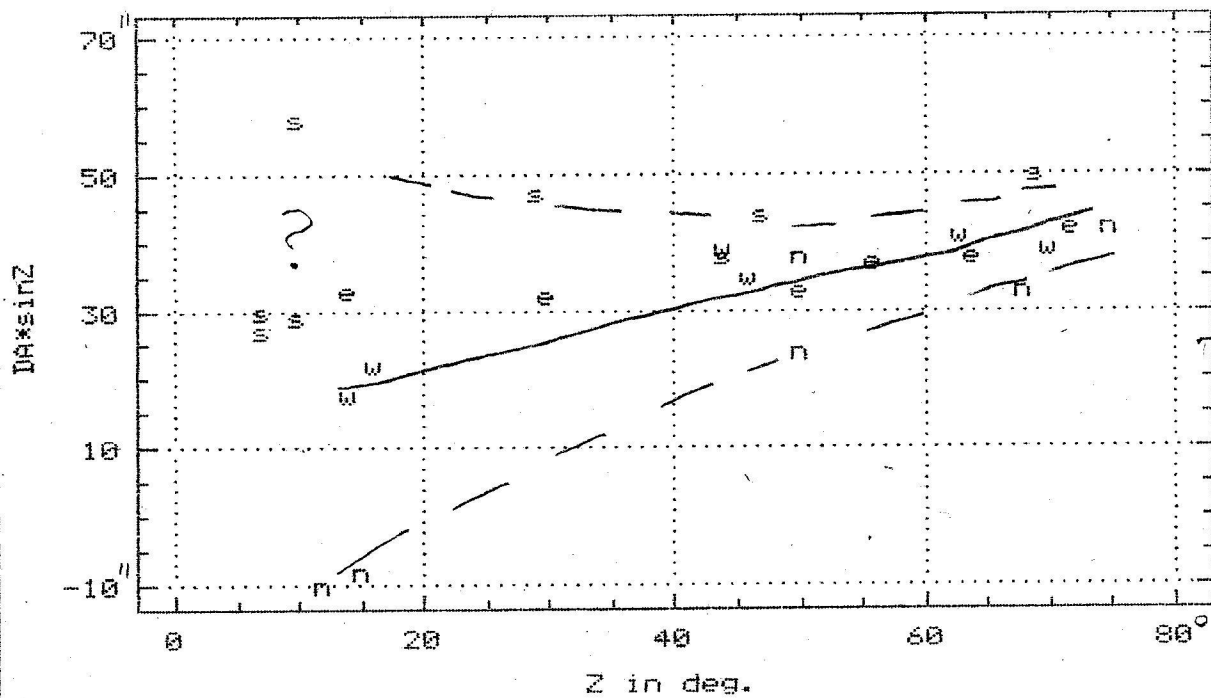
I. ПРОБЛЕМЫ СТАБИЛЬНОСТИ ПОЛОЖЕНИЯ ГЛАВНОГО ЗЕРКАЛА

В табл. I. I и на рис. I. I представлено поле ошибок наведения, полученное 5.03.1975 г. в первичном фокусе БТА (ПФ БТА). Здесь и далее ошибки наведения задаются в системе координат, оси которой определяются проекцией вертикала (ось ΔZ) и альмукуантарата (ось $\Delta \gamma = \Delta A \cdot \sin Z$) центра поля на фокальную плоскость.

Таблица I. I. Поле ошибок наведения в ПФ БТА 5.03.1975 г.
(наблюдатели В.Б.Небелицкий и В.Г.Данилов)

эцум-1				эцум-2			
A	Z	$\Delta \gamma$	ΔZ	A	Z	$\Delta \gamma$	ΔZ
1	2	3	4	5	6	7	8
-78 ⁰	56 ⁰	37''	15''	96 ⁰	46 ⁰	35''	-22''
-55	64	38	19	80	70	39	-19
-54	72	42	18	85	16	22	-17
-33	7	27	14				
-35	10	29	15				
94	14	18	-19	-100	14	33	13
96 ⁰	63 ⁰	41''	-20''	- 40 ⁰	30 ⁰	33''	12''

Pointing errors
prime focus, 5.03.1975



prime focus, 5.03.1975

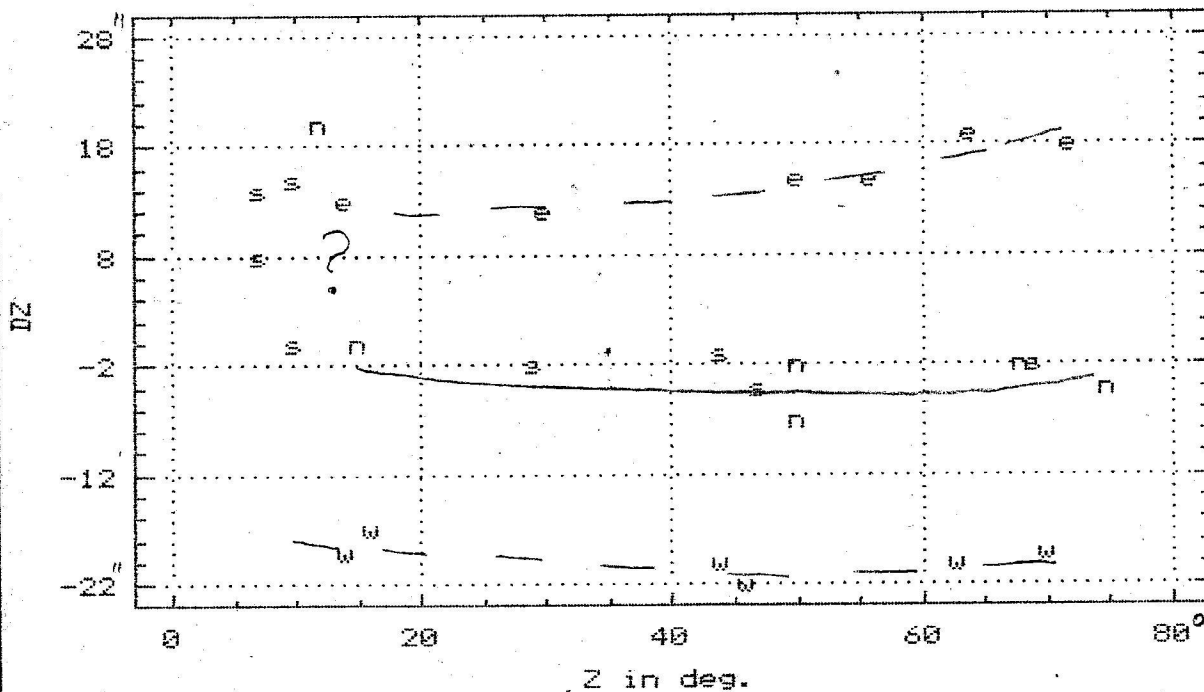


Рис.1.1. Поле ошибок наведения БТА 5.03.1975 г.
Приведены значения $\Delta\gamma(Z)$ и $\Delta Z(Z)$. Значки
v, n, w, e отмечают наблюдения в меридиане
и в I-ом вертикале.

Продолжение табл. I. I

1	2	3	4	5	6	7	8
94 ⁰	44 ⁰	39"	-20"	- 80 ⁰	50 ⁰	33"	15"
- 6	29	47	- 2	175	75	42	- 4
-13	10	33	- 2	170	50	38	- 7
- 2	44	38	- 1	184	15	- 8	0
175	68	33	- 2	- 12	7	30	8
180	50	24	- 2	- 3	47	44	- 4
190 ⁰	12 ⁰	-10"	20"	- 3 ⁰	69 ⁰	50"	- 2"

Интерпретация этого поля ошибок наведения затруднена, требуется предположить ошибку в звездном времени $\Delta S \approx 2$ сек., при исключении которой разброс $\Delta \gamma$ остается очень большим. Проведенные В.Я.Вайнбергом исследования показали, что главное зеркало (ГЗ) качается в оправе, вызывая качание его оси вплоть до 40". Совместно с деформациями монтажки в нестационарном температурном поле это определило сложившееся представление о сильной нестационарности поля ошибок наведения БТА и о возможности их исключения только созданием системы датчиков основных источников неустойчивости.

I. I. Совмещение оптического центра с центром поля КФ БТА.

Процедура юстировки главного зеркала изложена в работе [7], где даны постановка задачи, методика и результаты первых этапов. Здесь мы остановимся прежде всего на точностных характеристиках определения положения оптического центра методом Гартмана в реальных внешних условиях, а также на оценке качества системы фиксации плоскости зеркала.

Приведем ход этапов юстировочных работ. По результатам контроля 3.04.1984 г. была задана необходимая подвижка оптического центра

$$\Delta \gamma = +10'' = 1.16 \text{ мм}, \quad \Delta Z = - 75'' = - 8.73 \text{ мм},$$

что требует изменения показаний индикаторов, стоящих на крае зеркала

$$\Delta Z_y = + 1.02 \text{ мм}, \quad \Delta Z_x = - 0.419 \text{ мм}.$$

Сравниваем требуемую подвижку с осуществленной:

Индикатор	Z1	Z2	Z3	Z4
Задано	+1.02 мм	+0.42 мм	- 1.02 мм	- 0.42 мм
Фактически	+0.99 мм	+0.09 мм	- 1.08 мм	- 0.14 мм
Разность	-0.03 мм	-0.33 мм	- 0.06 мм	+ 0.28 мм

Отсюда находим ожидаемое положение оптического центра:

$$\Delta\gamma = + 18'', \Delta Z = + 10''.$$

Результаты оптического контроля 4.04.1984 дали

$$\Delta\gamma = + 28'' \pm 10'', \Delta Z = - 5'' \pm 10'',$$

где ошибки определяются из усреднения результатов обработки нескольких гартманограмм. По результатам этого контроля 5.04.1984 была задана подвижка оптического центра

$$\Delta\gamma = - 25'', \Delta Z = + 5'',$$

требуемое изменение положения края зеркала при этом

$$\Delta Z_y = - 0.24 \text{ мм}, \Delta Z_x = + 0.28 \text{ мм}.$$

Сравниваем требуемую подвижку с осуществленной:

Индикатор	Z1	Z2	Z3	Z4
Задано	-0.24 мм	+0.28 мм	+0.24 мм	- 0.28 мм
Фактически	-0.19 мм	+0.27 мм	+0.18 мм	- 0.37 мм
Разность	+0.05 мм	-0.01 мм	-0.06 мм	- 0.09 мм

Остаточные разности дают ожидаемое отклонение оптического центра от центра поля в пределах 10".

Оптический контроль в трудных погодных условиях дал следующие результаты:

Дата	$\Delta\gamma$	ΔZ
6.04.1984	00"	00"
	± 10	± 10
18.04.1984	-17"	-33"
	± 10	± 10
22.04.1984	00"	00"
	± 10	± 10

На этом юстировка ГЗ БТА была закончена. По данным анализа ее хода можно сделать следующие выводы:

- нет никаких систематических различий между данными оптического контроля, по которым задавались требуемые подвижки, и результатами выполненных по часовым индикаторам подвижек;

- по данным метода Гартмана сдвиг оптического центра относительно центра поля может быть сведен единственной подвижкой до значения, не превышающего 10";

- при больших перепадах температур в данные метода Гартмана может войти систематическая ошибка до 30".

Дальнейший ход событий в 1984 году напоминает крутой детектив, вскрывший основную причину нестационарности поля ошибок наведения БТА.

Днем 4.05.1984 коллимационная ошибка скачком возросла на $120''$, что явилось результатом отключения одной из фиксирующих опор. Телескоп был остановлен и положение ГЗ БТА было восстановлено 24.05.1984 г. Выполненные во второй половине 1984 г. исследования показали следующее (выводы на январь 1985 г.).

1. По данным метода Гартмана, коллимационная ошибка со временем возросла на $15'' - 20''$, причем оптический центр сдвинулся вдоль прямой, проходящей через центр зеркала и фиксирующую опору № 21.

2. Исследования поля ошибок наведения показали сдвиг кривых $\Delta\gamma$ и ΔZ , соответствующий изменению положения визирной оси трубы на $\Delta\gamma = -20''$ и $\Delta Z = +10''$, что полностью согласуется с изменениями, найденными из оптических исследований. В данных за 6.12.1984 г. четко проявилась нестабильность поля ошибок наведения: кривые ошибок при подъеме трубы сдвинуты относительно кривых, полученных при последующем опускании. Таким образом, за полугодие произошло не только изменение положения визирной оси, но и вновь возникла нестабильность ее положения при эволюциях трубы телескопа.

3. Прямые измерения положения плоскости зеркала при $Z = 0$ по часовым индикаторам показали, что в октябре 1984 г. возник наклон плоскости зеркала, приведший к сдвигу оптического центра на $15''$, причем направление сдвига совпадает с направлением на фиксирующую опору № 21. В ноябре - декабре наклон зеркала при $Z = 0$ стабилизировался и представлял собой подъем на 0.35 мм края зеркала вблизи опоры № 21. Амплитуда нестабильности положения оси ГЗ достигла значения $> 20''$, что в пять раз больше таковой,

зафиксированной после окончания юстировочных работ в мае 1984 г. Нестабильность характеризуется сильным гистерезисом, при полном ходе трубы по Z от 0 до 90° амплитуда гистерезиса превышала $10''$.

В результате технических работ, выполненных 6 - 12.02.1985 г., был устранен дефект исполнения фиксирующих опор № 21 и 33 (завышенные зазоры между опорным стаканом и отверстием в зеркале) и восстановлено положение плоскости зеркала по показаниям часовых индикаторов на май 1984 г. При этом была предпринята попытка дополнительной юстировки, выполненная без оптического контроля (по погодным условиям). Оценка качества юстировки была дана сравнением показаний часовых индикаторов за 29.05.1984, когда сдвиг оптического центра был в пределах $10''$, с окончательными показаниями часовых

индикаторов по завершении всех работ.

Индикатор	Z1	Z2	Z3	Z4
29.05.1984	4.58 мм	4.42 мм	5.75 мм	5.89 мм
11.02.1985	4.92	4.59	5.48	5.82
Разность	-0.34 мм	-0.17 мм	+0.27 мм	+0.07 мм

Отсюда находим сдвиг оптического центра относительно его положения 29.05.1984 г.:

$$\Delta\gamma = +8'', \quad \Delta Z = -20'',$$

то-есть ожидаемое смещение оптического центра относительно центра поля (центра компенсации вращения поля) составляет $\sim 20''$.

Результаты оптического контроля в 1985 - 86 гг. оказались весьма противоречивыми.

Таблица 1.2. Результаты метода Гартмана в 1985 - 86 годах.

$d_{0.85}$ - диаметр кружка рассеяния, содержащего 85% энергии.

A_{ik} - амплитуды аберраций Зайделя в волновом фронте.

U, V - параметры коллимационного сдвига.

Дата	$d_{0.85}$	A_{40}	A_{31}	A_{22}	U	V
4.03.1985	0.97''	1.5 мкм	2.3 мкм	1.2 мкм	-32''	-19''
	± 0.07	± 0.7	± 0.2	± 0.5	± 3	± 8
5.03.1985	1.34	7.3	1.2	1.4	+6	+18
	± 1.0	± 1.2	± 0.3	± 1.0	± 10	± 2
25.08.1985	1.10	2.5	2.9	1.8	+31	+36
	± 0.06	± 1.5	± 0.2	± 0.7	± 3	± 2
24.07.1986	0.92	3.1	0.6	1.1	+1	+6
	± 0.06	± 0.5	± 0.2	± 0.9	± 6	± 6
15.10.1986	1.06	5.2	1.4	1.4	+1	+22
	± 0.03	± 0.2	± 0.4	± 0.4	± 6	± 6
				Среднее	+1''	+13''
					± 18	± 18

Формально средние значения параметров коллимации U и V достаточно малы, но данные показывают очень большой разброс:

$$-32'' < U < +31'', \quad -19'' < V < +36''.$$

Поэтому прежде всего встает вопрос о вкладе тепловых деформаций поверхности ГЗ в определяемую по параметрам комы коллимационную ошибку. В табл. I.3 приведены результаты гартмановского теста в период типичного "теплового удара" – скачка наружной температуры на $\sim 10^{\circ}\text{C}$.

Таблица I.3. Результаты метода Гартмана в период теплового удара.

$t_{н,п,з}$ – соответственно температуры наружная, подкупольного и зеркала.

Дата	8.6.84	9.6.84	10.6.84	12.6.84	16.6.84
$d''_{0.9}$	0.87 ± 0	-	1.47	1.52	0.89 ± 0.01
A_{40} мкм	0.1 ± 0.3	-	4.7	6.4	0.9 ± 0.4
A_{31} мкм	1.1 ± 0.5	-	3.4	7.7	2.0 ± 0.2
A_{22} мкм	1.5 ± 0.6	-	5.0	2.2	1.3 ± 0.6
U''	11	-	26	53	22
V''	14	-	49	114	24
$t_{н}^{\circ}\text{C}$	13	15.5	4	4.5	7.5
$t_{п}^{\circ}\text{C}$	13	16	7	7	9.5
$t_{з}^{\circ}\text{C}$	12	12	12	9	8

Из данных табл. I.3 можно видеть, что при тепловых деформациях развивается сильная кома, так что разброс находимых из комы параметров коллимационного сдвига может быть полностью объяснен тепловыми деформациями ГЗ БТА в реальных условиях наблюдений, где в вариациях наружной температуры присутствует составляющая с характерным временем 3 – 5 суток и амплитудой $\sim 5^{\circ}\text{C}$. В ошибках наведений не обнаруживается вариаций коллимации до значений табл. I.2 и I.3, что подтверждает их "тепловую" природу.

Встает вопрос о необходимой точности совмещения оптического центра с центром поля. Дифракционный допуск на амплитуду комы составляет $A_{31} \leq 0.6\lambda \approx 0.3$ мкм, при этом число Штреля отличается от дифракционного не более чем на 20%. Отсюда находим дифракционный допуск на качество юстировки ПФ БТА:

$$\rho_{\text{колл}} = 4A_{31} (R \setminus f)^{-3} \leq 1.2 \cdot 10^{+3} \lambda,$$

что для $\lambda = 0.5$ мкм составляет $\rho_{\text{колл}} < 5''$. Для реального зеркала БТА, создающего изображение в ~ 20 раз больше дифракционного, этот допуск представляется избыточно жестким, поскольку кома амплитудой до $3-4 \lambda$ практически не влияет на качество изображения, так как приводит только к перераспределению локальных ошибок без увеличения кружка рассеяния. Поэтому мы приняли допуск на юстировку

$$\rho_{\text{колл}} \leq 20'',$$

что уже достигнуто в ходе проведенных в 1984 - 85 годах работ по юстировке и стабилизации положения ГЗ БТА. На рис. I.2 представлен прямой снимок, полученный Н.А.Тихоновым в ПФ БТА без корректора в 1986 г. Направление комы краевых изображений не противоречит утверждению о совпадении центра поля с оптическим центром в указанном допуске (ср. с аналогичным снимком 1983 г., приведенным в отчете [9]).

I.2. Стабильность положения главного зеркала в оправе.

Весовые деформации поверхности тонкого (1:10) главного зеркала БТА компенсируются системой 60-ти механизмов разгрузки, расположенных на 4-х окружностях. Положение главного зеркала в оправе задается 3-мя фиксирующими опорами и стержнем, проходящем через центральное отверстие в диске зеркала. Контроль положения зеркала в оправе осуществляется часовыми индикаторами, а также потенциометрическими датчиками, позволяющими оцифровать отсчеты и автоматизировать процедуру измерений.

В 1985 - 86 гг. проводился ежемесячный контроль положения ГЗ в оправе при направлении трубы в зенит, поскольку повторное отключение разгрузочного или фиксирующего механизма ставит под угрозу физическую целостность диска зеркала. В табл. I.4 представлены измеренные смещения положения оптического центра в 1985 г. (до алюминирования) и в 1985 - 87 гг. (после алюминирования) при $Z = 0$ (система x, y определяется проекцией растяжек на зеркало), относительно соответствующих средних в эти периоды.

Данные табл. I.4 показывают, что систематические эффекты наклона плоскости ГЗ БТА отсутствуют, то-есть не дают вклада в нестабильность поля ошибок наведения БТА. Снятие ГЗ для алюминирования в 1995 г. с последующей новой установкой в оправу изменило положение оптического центра на $\Delta x \cong -1''$ и $\Delta y \cong +2''$.

Качение зеркала в оправе при изменениях положения трубы телескопа измерялось системой потенциометрических датчиков, предварительно проверенных по показаниям традиционных часовых

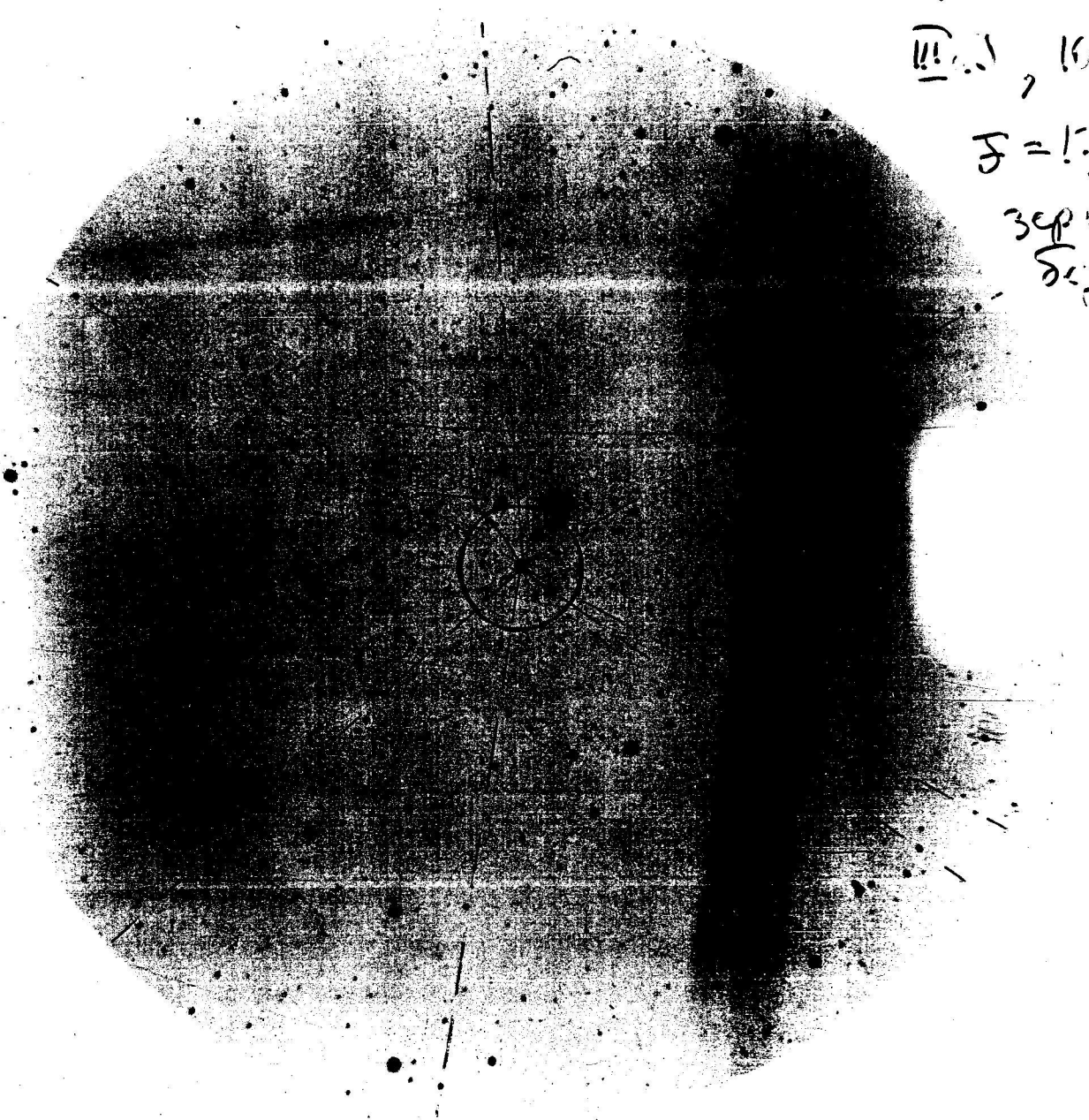


Рис. I.2. Прямой снимок в первичном фокусе БГА
без корректора (15.10.86, Н.А.Тихонов).
Отмечены центр поля и направления комы
краевых изображений.

индикаторов.

Таблица I.4. Стабильность положения плоскости ГЗ при $Z = 0$.

Дата	Δx	Δy	Дата	Δx	Δy
18.02.85	+0.8"	-0.1"	2.12.85	-0.6"	+0.8"
4.03.	+1.4	-0.6	21.01.86	-1.7	+0.8
15.03.	+0.6	+0.2	25.04.	+0.5	-0.6
26.03.	+0.3	0.0	05.06.	+0.1	-0.1
5.04.	-0.3	-0.3	18.08.	+1.1	-0.1
15.05.	-1.2	0.0	20.10.	+0.8	-1.1
12.06.	-0.3	+0.4	14.12.86	-0.3	+0.8
3.08.85	-1.1"	+0.4"	15.01.87	-0.6	+0.8
			23.02.87	-0.6"	-1.7"

В табл. I.5 приведены данные измерений качания плоскости ГЗ в 1985 г. после устранения дефектов фиксирующих опор.

Таблица I.5. Измерения качания плоскости ГЗ БТА в 1985 г.
Приведены смещения оптического центра Δx , Δy .

Дата	18.02.85		15.05.85		3.08.85		Среднее 85г. $\Delta x \pm \sigma$
	Δx	Δy	Δx	Δy	Δx	Δy	
00^0	0.0"	0.0"	0.0"	0.0"	0.0"	0.0"	0.0"
10	-0.4	0.8	-0.4	0.4	0.0	0.0	-0.3 \pm 0.2
20	-0.4	1.2	-1.2	0.0	-0.3	-0.3	-0.6 \pm 0.4
30	-1.2	1.2	-1.6	-0.4	-1.0	0.0	-1.3 \pm 0.3
40	-2.1	1.3	-2.4	-0.4	-1.0	-0.7	-2.0 \pm 0.6
50	-2.9	1.3	-3.3	0.5	-1.7	0.3	-2.6 \pm 0.7
60	-3.7	1.7	-4.1	-0.3	-3.1	0.0	-3.6 \pm 0.4
70	-4.6	1.4	-6.1	-0.2	-4.1	-0.7	-4.9 \pm 0.8
80	-5.4	1.4	-6.6	-0.6	-4.5	-1.0	-5.5 \pm 0.9
70	-5.4	1.0	-5.8	-0.6	-4.8	-1.0	-5.3 \pm 0.4
60	-5.7	0.9	-5.8	-1.1	-4.5	-1.0	-5.3 \pm 0.6
50	-4.1	0.5	-4.9	-1.1	-3.8	-1.0	-4.2 \pm 0.5
40	-2.9	0.5	-3.7	-1.5	-3.1	-0.7	-3.2 \pm 0.3
30	-2.4	0.4	-2.8	-0.4	-2.1	-1.0	-2.4 \pm 0.3
20	-1.6	-0.4	-2.0	-1.2	-1.0	-0.7	-1.5 \pm 0.4
10	-0.8	0.0	-1.2	-0.8	-0.7	-1.0	-0.9 \pm 0.2
00^0	-0.4"	0.4"	-1.2"	-0.4"	-1.0"	-0.3"	-0.9" \pm 0.3"

Из данных табл. I.5 следуют следующие характеристики качания зеркала в оправе после ревизии фиксирующих опор: а) в качании доминирует азимутальная составляющая с амплитудой до 6", тогда как амплитуда качания в плоскости вертикала не превышает $\pm 1.5''$;

б) имеется систематический сдвиг положения оптического центра при движении трубы вниз (верхняя часть таблицы) и вверх, причем амплитуда этого гистерезиса составляет $\sim 1''$. Наилучшее приближение азимутальной составляющей качания дается выражением вида

$$\Delta x = a + b \cdot \cos Z,$$

где для средней кривой за 1985 г. находятся следующие параметры

$$\Delta x = -7.7'' + 7.1'' \cdot \cos Z,$$

причем амплитуда гистерезиса не превосходит $1''$.

Более полно характеристики смещения зеркала в оправе при эволюциях трубы представлены в табл. I.6, где приведены $\Delta x, \Delta y$ - смещение оптического центра из-за наклонов плоскости ГЗ, $\delta x, \delta y$ - смещение оптического центра из-за смещения центра зеркала в соответствующем направлении, Δl - смещение плоскости зеркала вдоль оптической оси (измерения выполнены В.Н.Ерохиным 18.06.1990 г.).

Таблица I.6. Измеренные характеристики смещения ГЗ в оправе при изменениях Z трубы телескопа.

Z	Δl	Δx	Δy	δx	δy
00°	0.000 мм	0.0"	0.0"	0.0"	0.0"
10	0.002	-0.3	0.0	0.0	-0.2
20	0.015	-0.5	0.5	0.0	-0.2
30	0.031	-1.0	0.3	-0.1	-0.4
40	0.064	-1.3	0.5	-0.1	-0.6
50	0.096	-1.8	1.0	-0.1	-0.6
60	0.143	-2.7	0.5	-0.1	-0.6
70	0.188	-3.2	0.8	-0.1	-0.7
80	0.232	-3.8	0.3	-0.1	-0.7
70	0.199	-3.8	0.7	-0.1	-0.7
60	0.151	-3.0	0.3	-0.1	-0.7
50	0.111	-3.3	0.5	-0.1	-0.6
40	0.076	-2.5	0.0	-0.1	-0.6
30	0.052	-1.7	0.0	-0.1	-0.5
20	0.027	-1.5	-0.3	-0.1	-0.4
10	0.009	-0.2	0.0	0.0	-0.2
4°	0.004 мм	-0.7"	0.2"	0.0"	-0.1"

Hysteresis of the mirror rocking

18.6.1990

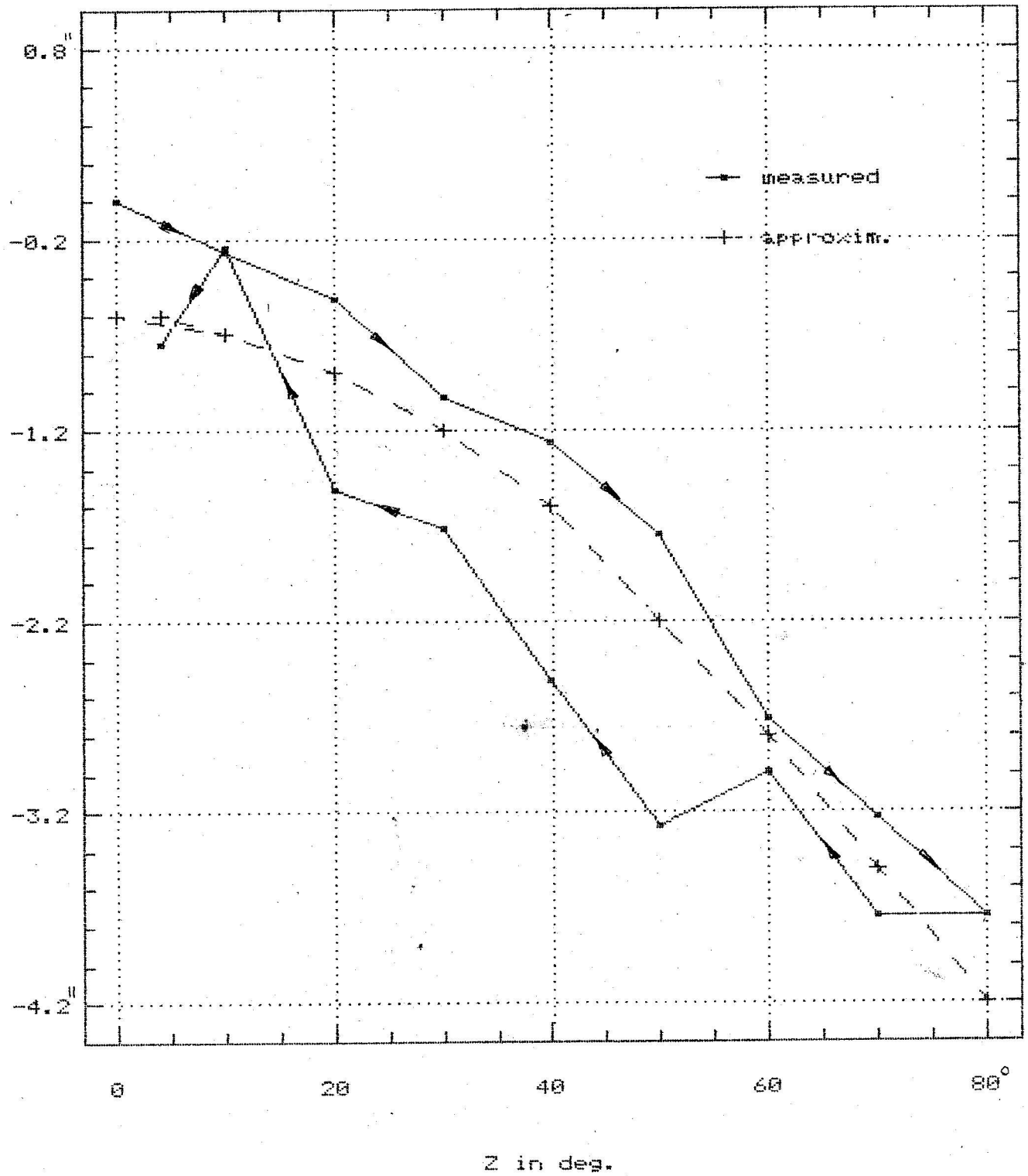


Рис. I.3. Иллюстрация гистерезиса качания зеркала в оправе. Стрелки отмечают направление движения трубы. Приведена аппроксимация измерений выражением $\Delta x = -5'' + 4.4 \cdot \cos Z$.

Можно видеть, что основным проявлением смещения зеркала в оправе является наклон оптической оси в азимутальном направлении, представляемый выражением

$$\Delta x = -5.0'' + 4.4'' \cdot \cos Z,$$

с амплитудой гистерезиса не более 1". Сдвиг зеркала и наклон оптической оси в плоскости вертикала лежат в пределах $\sim 1''$, наклон оси ГЗ при возрастании Z сопровождается "выталкиванием" зеркала вдоль оси на $\Delta l \leq 0.2$ мм. Таким образом, имевшееся ранее мнение о крайней нестабильности положения оптической оси ГЗ БТА сейчас не имеет никаких оснований. Характер сдвига оптического центра при наклонах трубы, явление гистерезиса и аппроксимацию косинусоидальным законом иллюстрирует рис. 1.3.

Встает вопрос о точности измерений положения зеркала в оправе в связи с включением "датчиков геометрии" в систему управления БТА. Приведем пример потенциометрических датчиков положения ГЗ, калибруемых с помощью щупов заданной толщины. В таблице даны отсчеты цифрового вольтметра при данной толщине щупа, а также найденные коэффициенты пересчета показаний вольтметра в линейные перемещения.

№ датчика	1	2	3	4
d щупа				
0.00 мм	18.47	16.3	17.0	19.4
0.10	19.9	17.7	18.3	20.7
0.15	20.6	18.4	19.0	21.4
($\Delta d \backslash \Delta v$)	0.069	0.071	0.074	0.074
	± 2	± 0	± 2	± 2

Отсюда получаем средний коэффициент для всех датчиков ($\Delta d \backslash \Delta v$) = (0.0725 ± 0.0015) , что при среднем отсчете вольтметра ~ 15 дает ошибку определения линейного перемещения $\Delta d \cong \pm 0.02$ мм. Эта ошибка приводит к неопределенности в положении оптического центра $\Delta x \cong \pm 1.6''$. Для целей наведения эта точность могла бы быть достаточной, но включение в процесс ведения показаний этих датчиков, учитывая и их инерционность, совершенно недопустимо (что и проявилось в возбуждении колебаний телескопа при внедрении СКН).

В целом, анализ характеристик положения ГЗ БТА в оправе приводит к следующим заключениям.

1. Качество юстировки ГЗ БТА достаточно для реализации оптического качества изображения.

2. В "качаниях" зеркала в оправе основным эффектом является сдвиг оптического центра в азимутальном направлении,

аппроксимируемый выражением вида

$$\Delta x = a + b \cdot \cos Z, \quad (2.1)$$

где амплитуда $b \cong 5''$ сохраняется на протяжении уже 5 - 6 лет. Гистерезис качания по амплитуде не превышает $1''$. Оба явления - качание оси и гистерезис - определяются, скорее всего, неравномерным распределением плотности в диске зеркала, тогда как механизмы разгрузок отъюстированы под теоретическое равномерное распределение, а также малыми люфтами в механизмах разгрузок.

3. Гистерезис качания зеркала в оправе $\pm 1''$, то-есть зависимость положения оптического центра от предистории движения трубы, а также переменный знак качаний оптической оси в плоскости вертикала $\pm 1''$ определяют предел физически достижимой точности наведения БТА $\sim \pm 1.5''$, при программном исключении ошибок геометрии.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЯМЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ГЕОМЕТРИИ БТА

Возможность коррекции ошибок геометрии телескопа рассматривалась при проектировании системы управления БТА [9-11]. В связи с низкой точностью наведения и с необходимостью ее улучшения при замене центральной управляющей ЭВМ АСУ БТА, в 1980 - 85 годах сотрудниками ЦНИМГАИК были выполнены прямые измерения геометрии телескопа, результаты которых обобщены в диссертации В.Я. Вайнберга [12]. - Здесь нужно отметить, что прямые измерения обязательны для разделения вклада различных источников ошибок, поскольку в полях ошибок наведений они не разделяются. Результаты исследований ЦНИМГАИК достаточно полно опубликованы [12-14], поэтому здесь мы приводим основные выводы [12], необходимые для обсуждения анализа полей ошибок наведения.

1. Вертикальная ось телескопа практически не дает вклада в ошибку наведения, случайные биения ее лежат в пределах $0.1''$ и сезонные изменения положения не превышают $1.5''$.

2. Неперпендикулярность горизонтальной оси лежит в пределах $20''$ и зависит от разности температур стоек, систематические биения ее не превышают $5''$.

3. Амплитуда накопленной ошибки датчиков обратной связи (датчиков угла ДОС) составляет $\sim 6''$ и $20''$ для азимутального и датчика зенитных расстояний соответственно.

4. Зеркало в оправе "качается" в основном по азимуту с

амплитудой $\sim 13''$ в положении оптической оси, причем имеет место гистерезис с амплитудой до $4''$.

На основании этих данных В.Я.Вайнберг разработал внедренную на БТА систему коррекции наведения (СКН) [15], включающую в себя три процедуры:

- программное исключение ошибок "средней геометрии" телескопа (наклоны осей, стационарные ошибки ДОСов, гнутые трубы);
- измерения датчиками положения тепловых и механических деформаций монтировки и положения зеркала в оправе;
- замена абсолютных датчиков положения осей телескопа разделенным кругом, построенным с помощью датчиков Холла на ведомых шестернях осей азимута и высоты.

В процессе работ по стабилизации положения ГЗ и внедрения СКН идеология ее эволюционировала от чисто аппаратного решения к выделению "ошибок геометрии", устраняемых программным путем, и ошибок уже второго порядка, измеряемых аппаратными средствами (датчики геометрии). Фактически работоспособной оказалась только часть, программно исключая ошибки геометрии телескопа. Разрешающая способность и временные характеристики датчиков геометрии оказались недостаточными для задачи, попытка их включения в процесс ведения приводила к возбуждению колебаний телескопа. В результате СКН была исключена из режима ведения, что снижает возможность исключения накопленных ошибок ведения. Здоровая идея разделенного круга оказалась неактуальной, так как не повышалась разрешающая способность ДОСов. Эти заключения возникли и утверждались в ходе анализа полей ошибок наведения и исследований динамики БТА, когда проблема точности наведения и методы ее решения потеряли самодовлеющий характер и стали рассматриваться как часть более общей проблемы точностных характеристик БТА.

3. АНАЛИЗ ПОЛЕЙ ОШИБОК НАВЕДЕНИЯ БТА

Пример поля ошибок наведения БТА, полученного после завершения работ по стабилизации ГЗ, представлен на рис.3.1 (в системе координат $\Delta\gamma$ и ΔZ). Сравнение с данными рис.1.1 показывает, что после стабилизации ГЗ в поле ошибок наведения проявились четкие зависимости от зенитного расстояния Z , ожидаемые из теории альт-азимутальной монтировки [9-II]. Поэтому была предпринята попытка ввести простейшую коррекцию ошибок геометрии выражениями (нуль-пункт Z-датчика был исправлен):

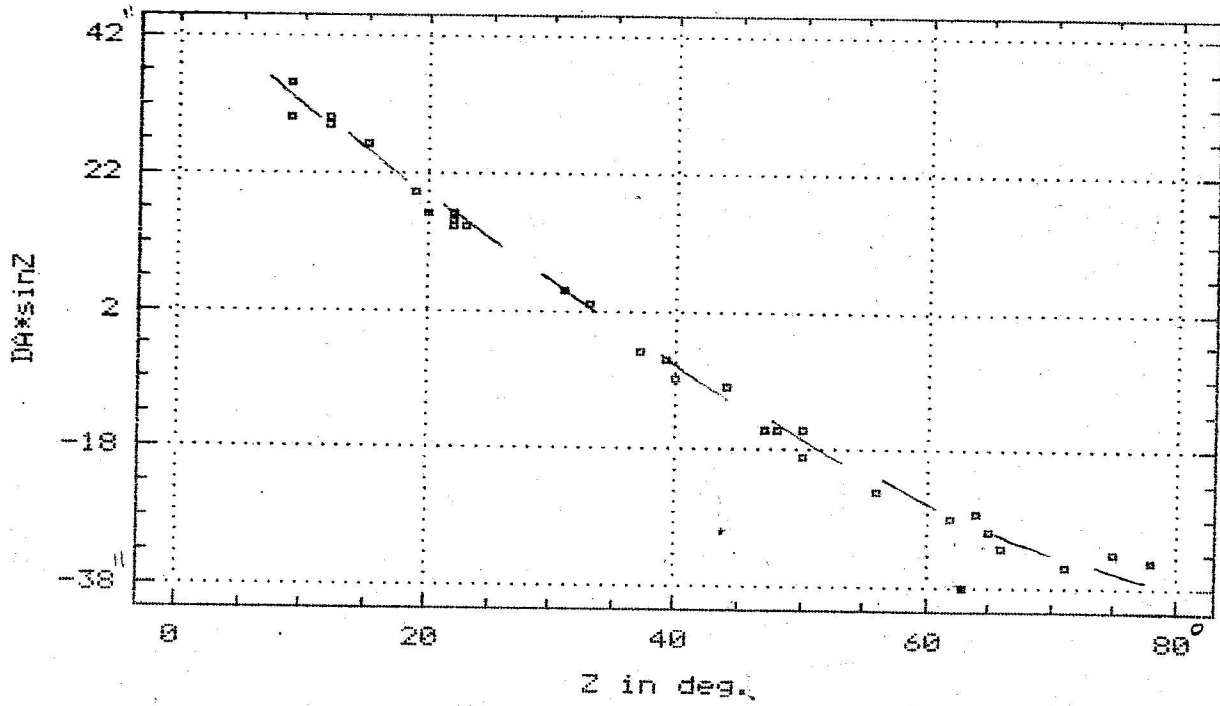
$$\begin{aligned}\Delta\gamma &= \Delta A \cdot \sin Z = -90'' \cdot \sin Z + 10'' \cdot \cos Z + 35'', \\ \Delta Z &= +2.6'',\end{aligned}$$

соответствующие подпрограммы были "прошиты" в управляющую программу старой ЭЦМ Р.П.Даниловой. На рис.3.2 представлено поле ошибок наведения, полученное 30.08.1985 г. с указанной программной коррекцией наведения. Среднеквадратичная ошибка наведения по обеим координатам составила $\sigma \cong 3.5''$, после уточнения параметров геометрии и учета гнуптия трубы значение σ снижается до $1.5''$. В атмосфере ожидаемой нестабильности геометрии телескопа этот результат произвел сильное впечатление, потерянное затем в ходе работ по замене ЭВМ, отладке новой управляющей программы и решению проблем, возникших при внедрении аппаратной части СКН.

В дальнейшем мы приводим результаты анализа полей ошибок наведения. Система координат в фокальной плоскости, в которой измерялись ошибки наведения, определяется проекцией вертикала (ось ΔZ) и альмукантарата (ось $\Delta\gamma = \Delta A \cdot \sin Z$) центра поля. В первичном фокусе центр поля определяется центром вращения стола, в фокусах Нэсмита N1 и N2 - центрами щелей стационарных спектрографов. В обоих случаях - точность определения ошибок наведения не превышает $1'' - 2''$ ввиду визуального наведения размытого звездного изображения, атмосферной дисперсии, качания телескопа при ветре и т.д. Координаты звезд на данную дату выбирались из каталога видимых мест звезд Астрономического Ежегодника. В анализ поля ошибок наведения мы включали следующие составляющие ошибок геометрии телескопа:

- наклон вертикальной оси телескопа,
- неперпендикулярность горизонтальной и вертикальной осей,
- неперпендикулярность горизонтальной и визирной осей телескопа (коллимационная ошибка),

Pointing errors
prime focus, 5.4.1985



prime focus, 5.4.1985

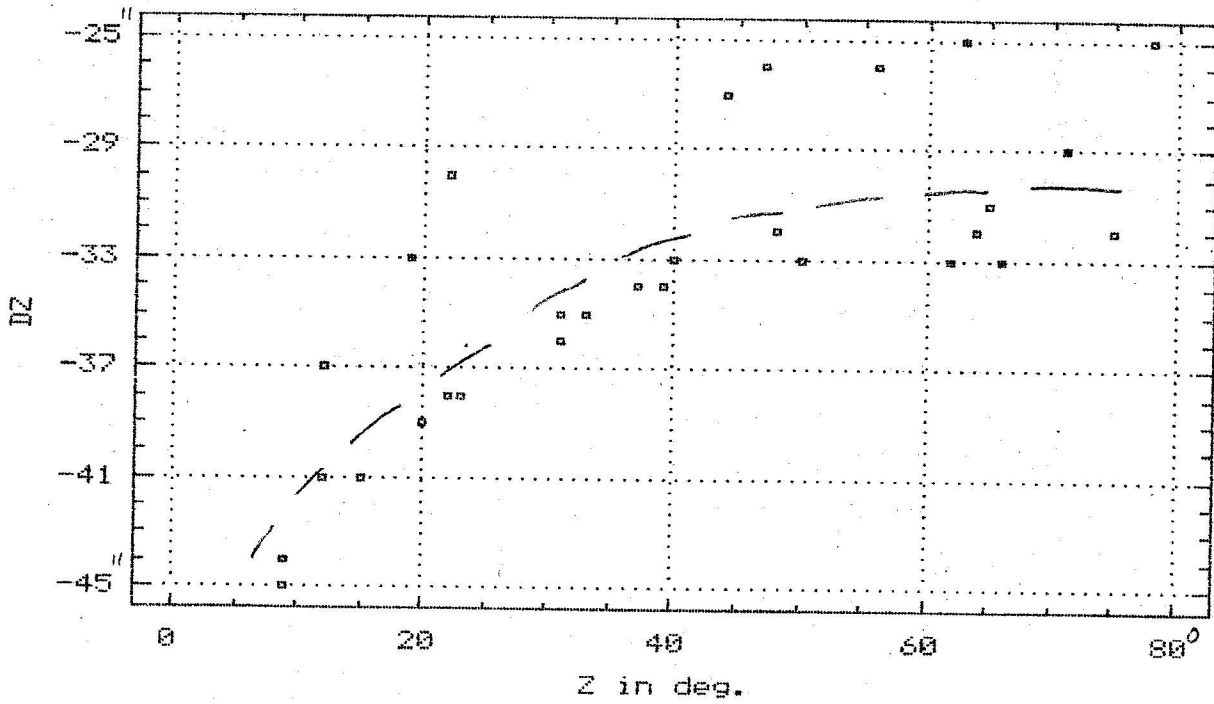
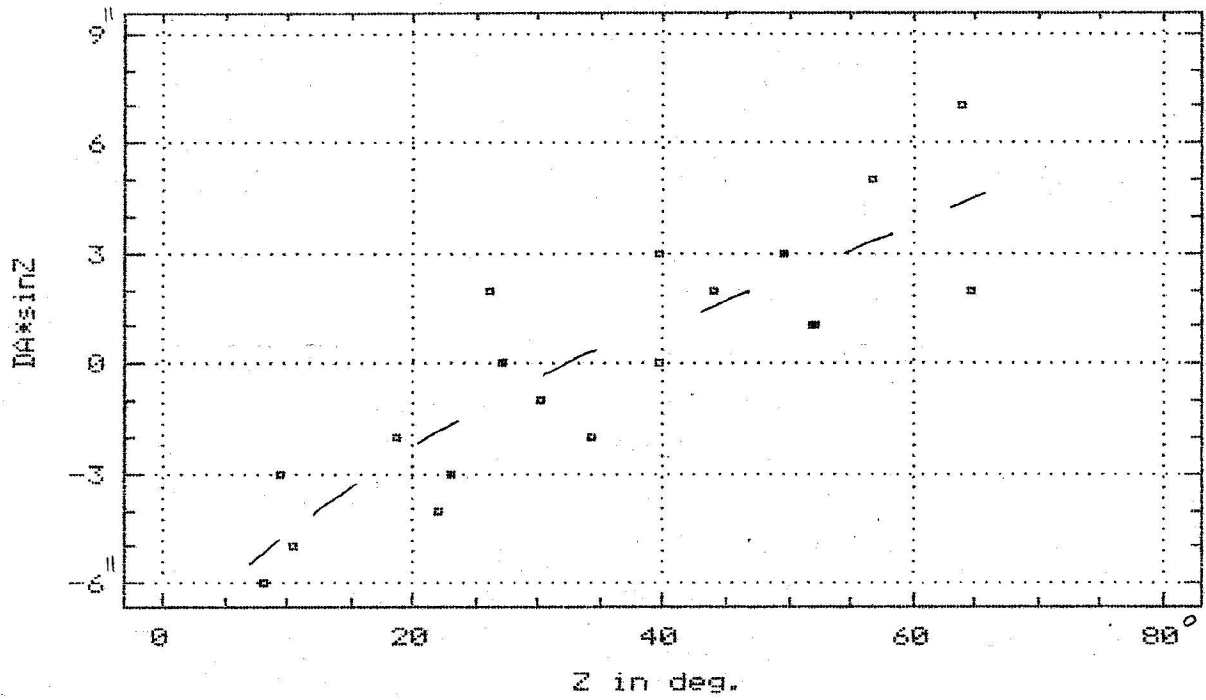


Рис.3.1. Поле ошибок наведения БТА 5.04.1985 г.,
после стабилизации положения ГЗ в оправе.

Pointing errors with correction
 prime focus, 30.8.1985



prime focus, 30.8.1985

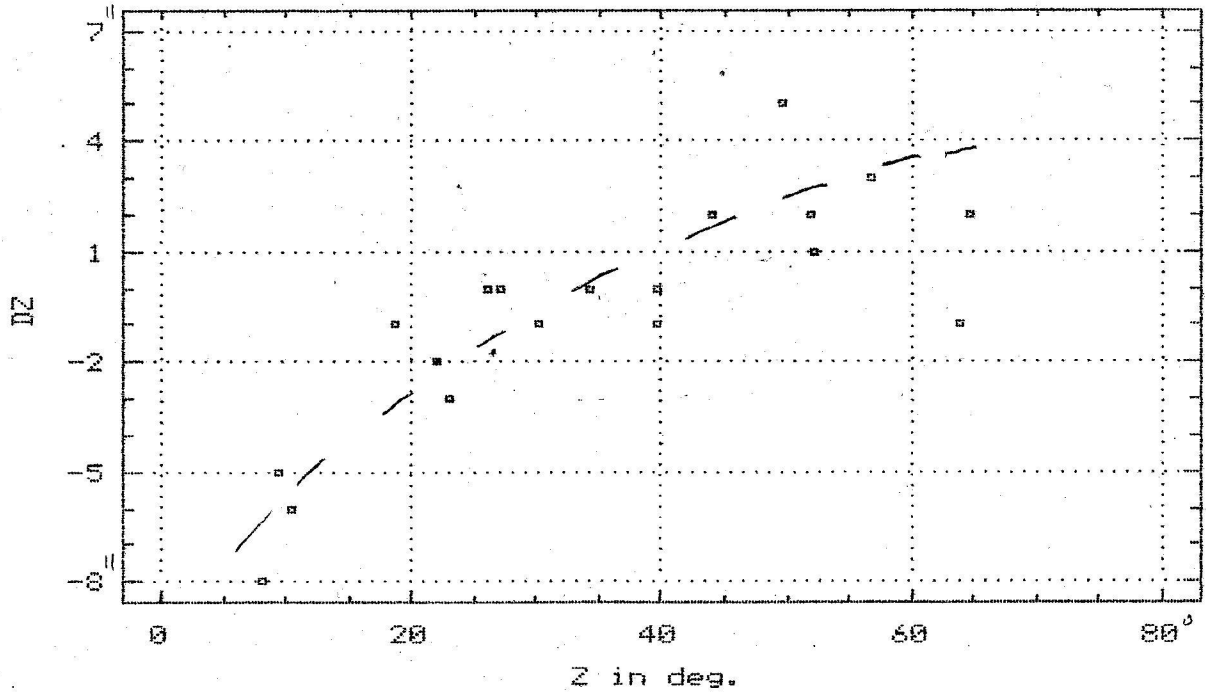


Рис.3.2 Поле ошибок наведения БТА 30.08.1985 г.
 с коррекцией наведения

$$\Delta\gamma = -90'' \cdot \sin Z + 10'' \cdot \cos Z + 35''$$

$$\Delta Z = +2.2''$$

- ошибки нуль-пунктов угловых датчиков (ДОСов),
- гнутие трубы телескопа,
- ошибки часового угла.

Выражения для соответствующих ошибок приведены в [9-II], ввиду малого значения поправок использовались только члены поправок первого порядка. В соответствии с общей теорией астрономо-геодезических наблюдений [16], поля ошибок измерялись в меридиане и I-ом вертикале.

3.1. Стабильность параметров средней геометрии БТА.

Система условных уравнений, описывающая поле ошибок наведения для средней геометрии БТА, первоначально была принята в следующем виде:

$$\Delta\gamma = \Delta A_0 \cdot \sin Z + L \cdot \cos Z + k + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \Delta S, \quad (3.1)$$

$$\Delta Z = \Delta Z_0 + d \cdot \sin Z + \cos \varphi \cdot \sin A \cdot \Delta S, \quad (3.2)$$

где коэффициенты описывают: $\Delta A_0, \Delta Z_0$ - ошибки нуль-пунктов, L - наклон горизонтальной оси, k - коллимационную ошибку, d - гнутие трубы, ΔS - ошибку времени (δ - склонение, φ - параллактический угол, φ - широта места). Поскольку были приняты линейные выражения для поправок, то уравнения (3.1) и (3.2) связаны только членом с ΔS . По погодным условиям чаще всего не удавалось провести наблюдения в северной части меридиана, и расщепление систем (3.1) и (3.2) позволило применить следующую схему решения для обработки в том числе и неполных рядов: решение системы (3.2) давало значение ΔS , член с ΔS исключался из (3.1) с последующим решением этой системы для остающихся параметров. В табл.3.1 представлены результаты определения параметров средней геометрии БТА методом наименьших квадратов из полей ошибок наведения в 1989 - 91 годах.

Для азимутальной составляющей в данных табл.3.1 прежде всего обращают на себя внимание большие ошибки находимых методом наименьших квадратов параметров, а также переменность параметров от даты к дате:

$$-90'' < \Delta A_0 < -73'', \quad -8'' < L < 19'', \quad 19'' < k < 45'',$$

что позволяет заподозрить нестационарность средней геометрии БТА. Однако сразу отметим, что (3.1) является модальным представлением поля ошибок, а не разложением по ортогональным функциям. В общем случае это вызывает плохую определенность системы нормальных уравнений и соответствующего решения [17, гл. 17-18]. Рассмотрим систему (3.1) без временного члена с ΔS .

Таблица 3.1. Параметры средней геометрии ПФ БТА,
система (3.1) - (3.2).

Дата	ΔA_0	L	k	ΔZ_0	d	ΔS
23.01.89	-90" ±7	-8" ±8	48" ±10	9" ±1	11" ±1	-8" ±1
21.03.89	-85 ±3	2 ±4	41 ±5	11 ±1	4 ±2	3 ±1
22.03.89	-77 ±4	9 ±4	31 ±5	9 ±1	-7 ±2	4 ±1
12.10.89	-90 ±6	1 ±9	44 ±10	7 ±1	8 ±1	2 ±1
7.03.90	-89 ±5	8 ±5	39 ±7	4 ±2	3 ±2	8 ±2
18.07.90	-73 ±4	19 ±5	19 ±6	-17 ±2	11 ±3	6 ±2
24.07.90	-82 ±3	9 ±4	30 ±5	-7 ±1	-1 ±2	8 ±1
27.07.90	-85 ±4	8 ±4	30 ±5	-1 ±1	-4 ±2	9 ±1
3.08.90	-86 ±2	7 ±3	46 ±3	-4 ±1	-4 ±2	8 ±1
4.03.91	-80 ±6	12 ±8	30 ±10	-2 ±2	6 ±3	2 ±1
24.12.91	-80" ±3	11" ±3	34" ±4	2" ±1	-9" ±2	2" ±1

Заменяя суммирование интегрированием по полусфере, получим оценку определителя системы нормальных уравнений:

$$D = \begin{vmatrix} \pi & 2 & 4 \\ 2 & \pi & 4 \\ 4 & 4 & 2\pi \end{vmatrix} \approx 5.4 \cdot 10^{-3}. \quad (3.3)$$

Таким образом, определитель системы действительно очень мал и система плохо определена - разные выборки полей ошибок наведений дадут отличающиеся решения (даже при малой сумме квадратов уклонений). Из (3.3) находим следующую линейную связь между коэффициентами системы

$$a_1 + b_1 \approx 1.3 \cdot c_1.$$

Исключая ее из исходной системы, получаем систему

$$a_1 \cdot (\Delta A_0 - L) + c_1 \cdot (1.3 \cdot L + k) = d_1,$$

Linear dependence parameters of (3.1)

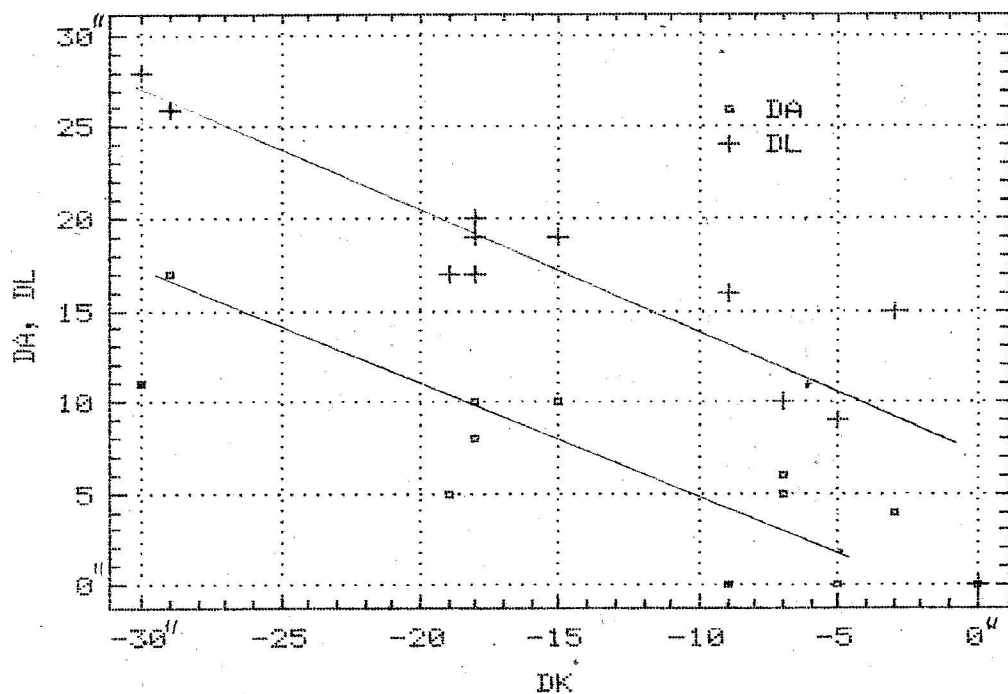


Рис.3.3. Решения системы (3.1) в 1989 - 91 гг.
из табл.3.1 (нуль-пункт - данные за 23.01.89).

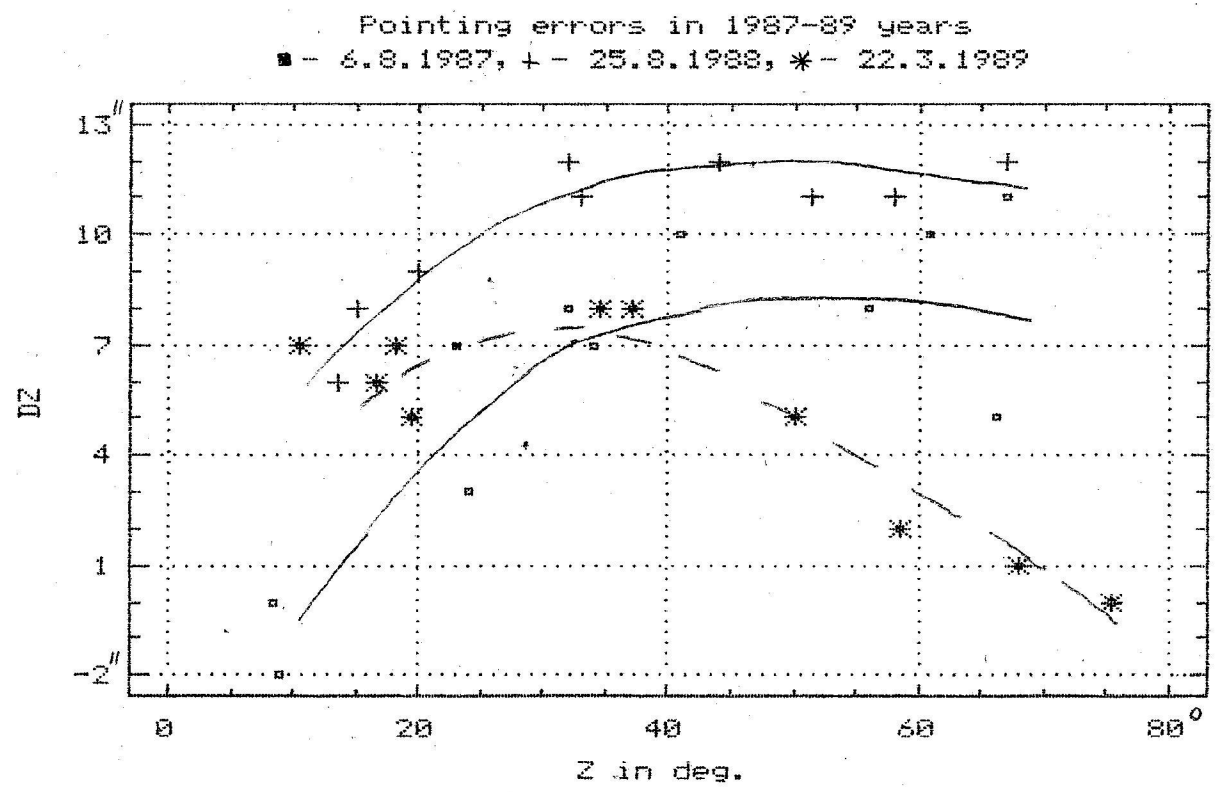
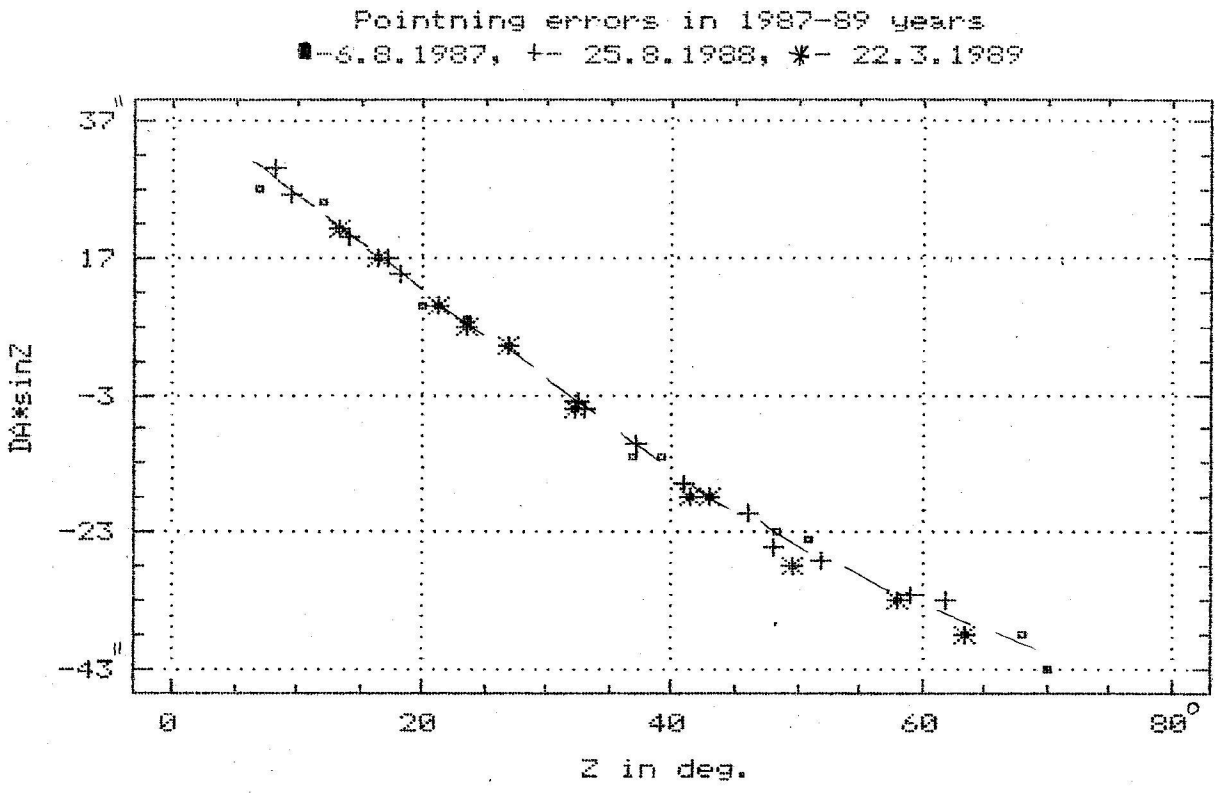
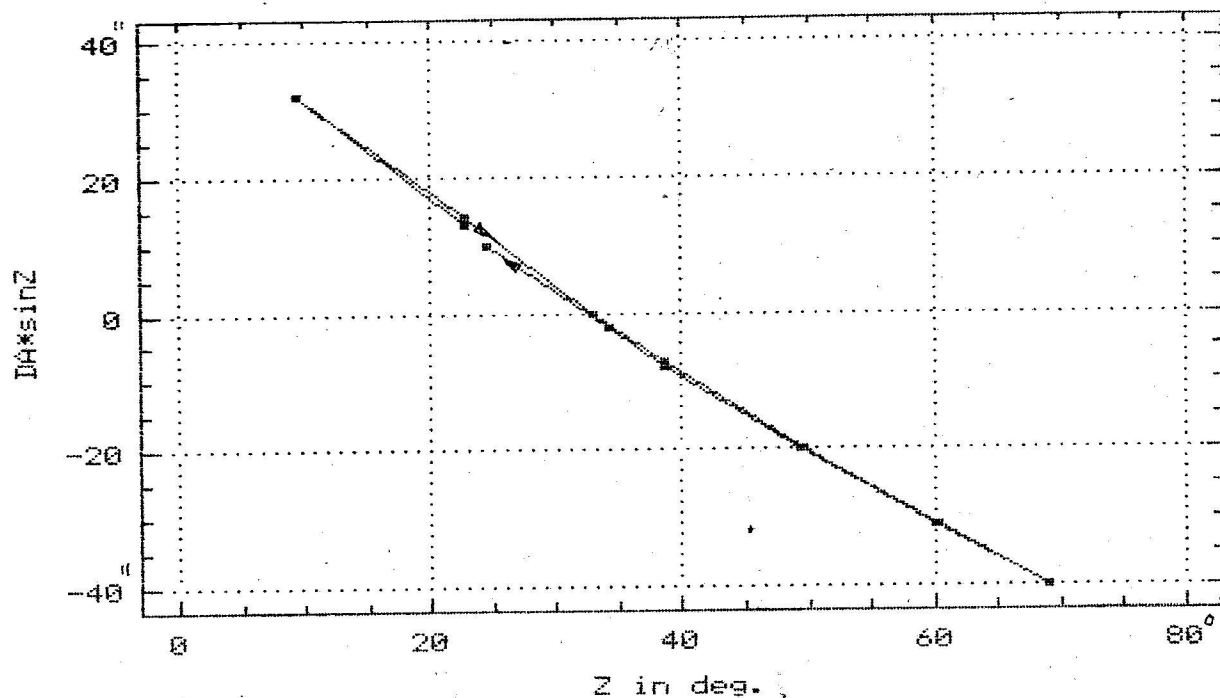


Рис.3.4. Выборочные поля ошибок наведения в 1987 - 89 гг.
 .Для $\Delta\gamma$ -составляющей азимут $A \approx \pm 90^\circ$, для
 ΔZ -составляющей $A \approx 0$ и 180° .

Hysteresis of mirror rocking
prime focus, 24.7.90



prime focus, 24.7.1990

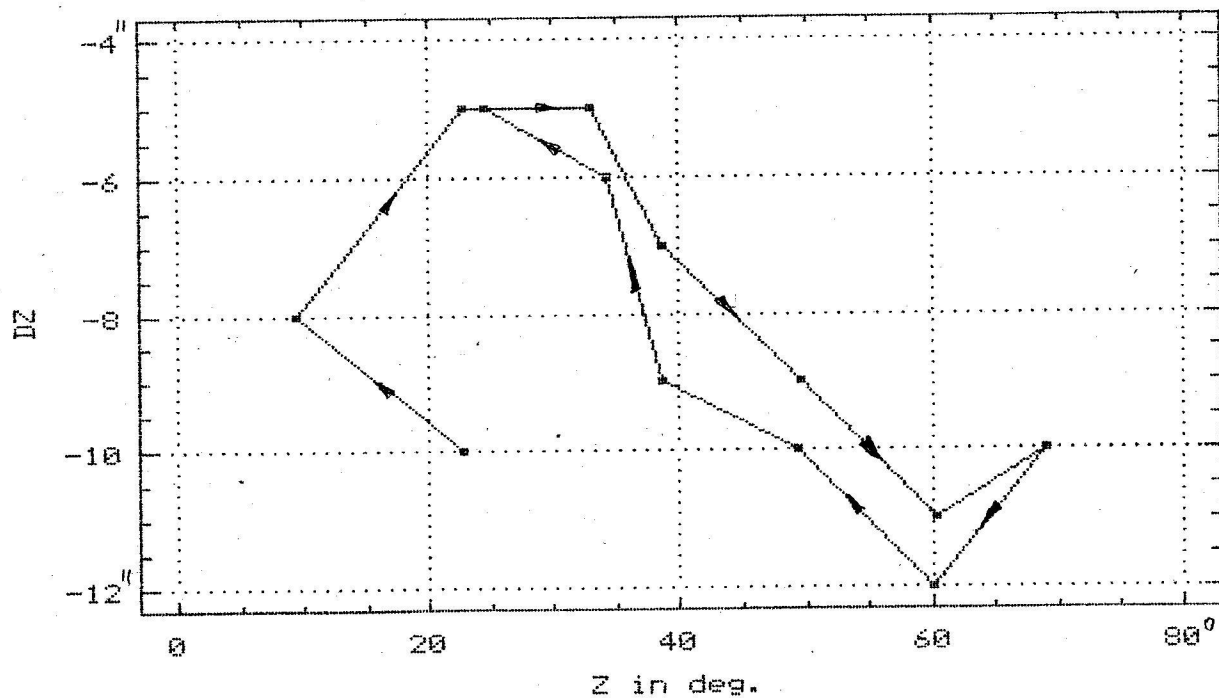
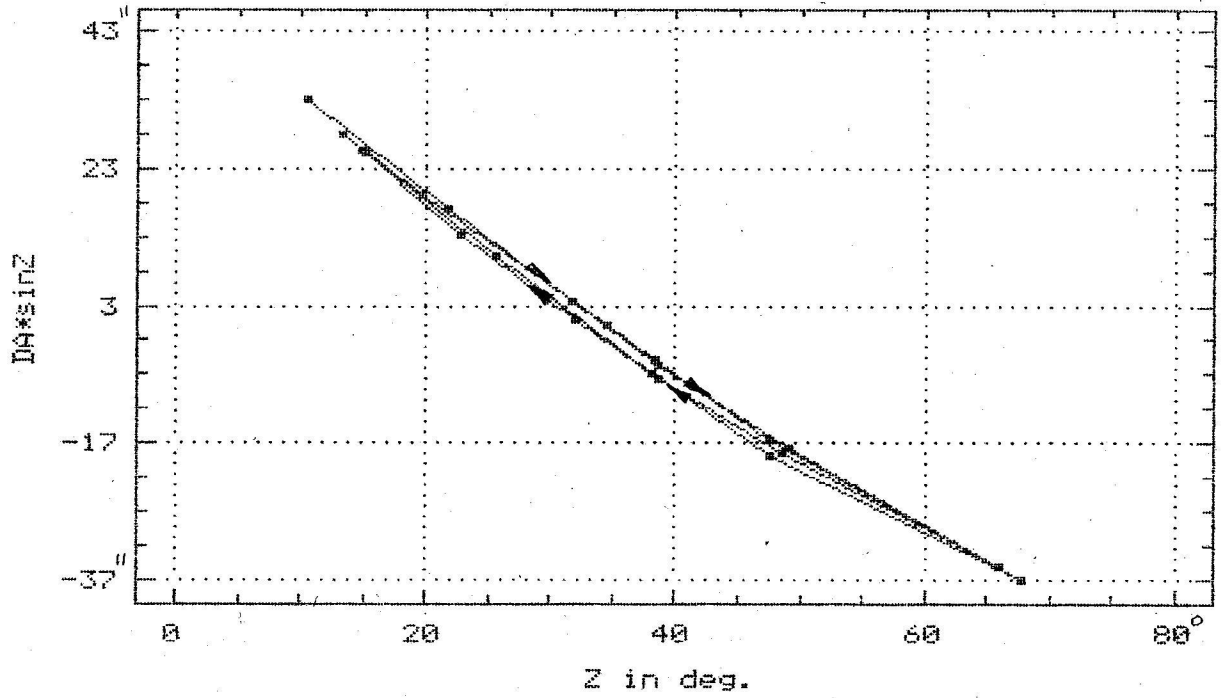


Рис.3.5а. Поле ошибок наведения в ПФ БТА, $\Delta \approx 0$,
стрелки показывают движение трубы.

Hysteresis of mirror rocking
focus N2, 24.12.1991



focus N2, 24.12.1991

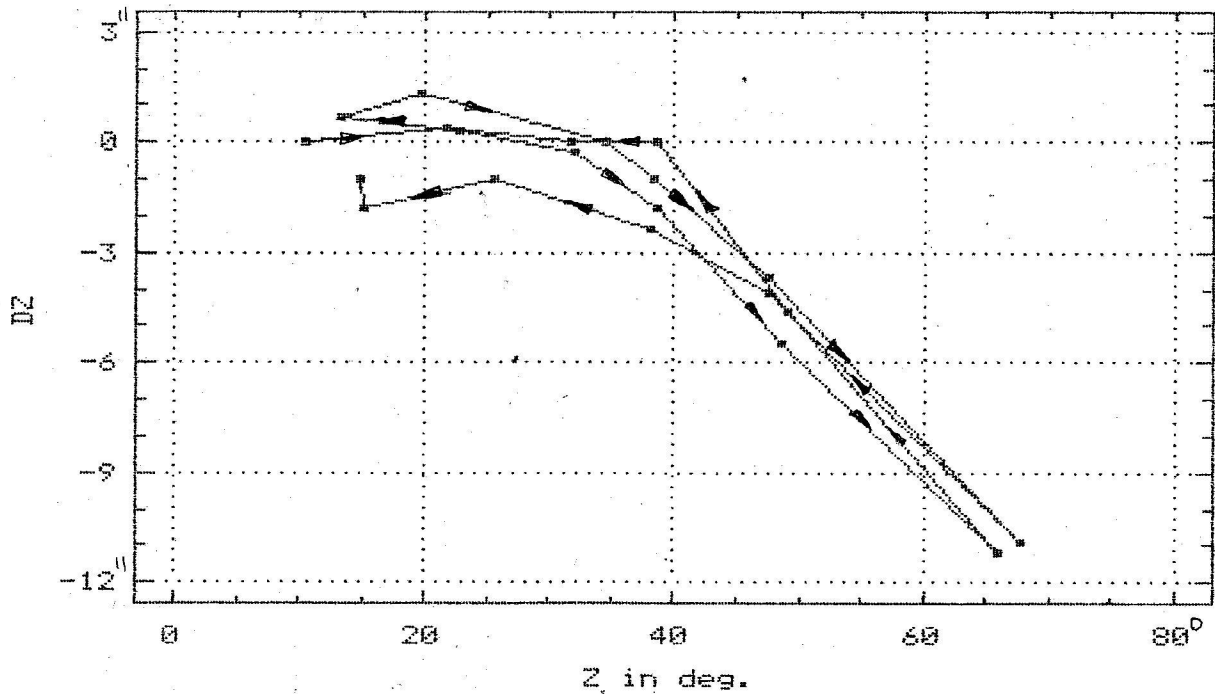


Рис.3.56. Поле ошибок наведения в фокусе N2 БТА, $A \approx 0$,
стрелки показывают движение труб.

откуда следует, что любое решение системы (3.1) с поправками

$$\delta A_0 = \delta L = -\delta k \cdot I.3$$

также является решением этой системы. Потребовав, чтобы возникающие невязки условных уравнений не превосходили половины ошибки δ в установке звезды на центр поля, окончательно находим диапазон неопределенности решения (3.1):

$$\delta A_0 = \delta L \cong -0.77 \cdot \delta k \leq \pm \delta \cdot 0.15, \quad (3.4)$$

что при $\delta \sim 1''$ полностью объясняет диапазон ошибок определения параметров системы (3.1).

На рис.3.3 представлены параметры азимутальной составляющей поля ошибок наведения из табл.3.1, где за нуль-пункт приняты данные за 23.01.1989 г. Можно видеть линейные тренды, для которых методом наименьших квадратов находим

$$\delta A = -3'' - 0.75 \cdot \delta k, \quad \delta L = +6'' - 0.75 \cdot \delta k, \quad (3.5)$$

что практически, с точностью до нуль-пункта, совпадает с (3.4).

Таким образом, и переменность параметров для азимутальной составляющей в табл.3.1 отражает неопределенность математического решения системы (3.1), а не физическую нестабильность геометрии телескопа. Более того, после исключения линейной зависимости (3.5) из данных табл.3.1 остаточная переменность параметров сводится к значению $\sigma \cong 2''$, что говорит о высокой стабильности параметров азимутальной составляющей поля ошибок наведения БТА.

На рис.3.4 представлены выборочные поля ошибок для трех лет. Для минимизации ошибки времени (см. далее) даны наблюдения только в вертикалах $A = \pm 90^\circ$ для $\Delta \gamma$ и только в меридиане для ΔZ . Можно видеть, что азимутальные кривые $\Delta \gamma$ практически совпадают, большая часть расхождений определяется ошибкой времени ΔS . Азимутальная часть качания зеркала в оправе (2.1) полностью растворяется в параметрах системы (3.1) ΔA_0 и L , так что отдельно не может быть выделена из поля ошибок. Многолетняя стабильность $\Delta \gamma$ -составляющей поля ошибок наведения подтверждает и стабильность параметров качания зеркала, находимых из прямых измерений. На рис.3.5 показаны ошибки наведения в меридиане при последовательном подъеме и опускании трубы. Можно видеть, что в $\Delta \gamma$ -составляющей гистерезис качания ГЗ обнаруживается, но амплитуда его не превышает $1''$.

Здесь нужно отметить, что при наблюдениях на "толодном" телескопе проявляется имитирующий гистерезис временной тод ошибок наведения, связанный с деформациями прогреваемой маслом монтажки. Амплитуда этого эффекта $1'' - 3''$, явление исчезает через ~ 1 час работы телескопа. По-видимому, это единственная нестационарность на

коротких временах, обнаруживаемая в $\Delta\gamma$ -составляющей ошибок наведения.

В целом, вышеизложенное позволяет сделать заключение о стационарности азимутальной составляющей поля ошибок наведения БТА. Отсюда следует вывод о возможности исключения азимутальной составляющей чисто программным путем, при этом можно достичь точности наведения, ограничиваемой только гистерезисом качания зеркала в оправе.

Анализ системы условных уравнений для ΔZ -составляющей поля ошибок наведения в принципе дает уже приведенные результаты, поскольку эта система полностью аналогична (3.1). Однако данные типа приведенных на рис.3.4 и 3.5 показывают, что в ΔZ -составляющей имеется неустойчивость с размахом $\sim 10''$ на всех временных интервалах. Поэтому ΔZ -составляющая требует отдельного рассмотрения.

3.2. Гнутые трубы и стабильность ΔZ -составляющей.

При исследовании нагрузок в подвеске Z было обнаружено ее продольное смещение при движениях телескопа. В рамках развития СКН был установлен датчик линейных перемещений подвески Z. В табл.3.2 приведены выполненные В.Г.Даниловым измерения смещения подвески, данные приведены к изменению положения трубы.

Таблица 3.2 Смещение положения подвески Z 14.03.1992 г.
Данные приведены к повороту выходной оси Z.

Z	1 сет	2 сет	Дебаланс+2
70°	0.4"	0"	-0.6"
60	-1.2	-1.2	-2.3
50	-2.3	-2.5	-3.3
40	-3.3	-3.2	-4.1
30	-4.3	-4.1	-4.8
20	-5.0	-5.0	-5.2
10	-5.2	-5.0	-5.4"
6	-5.1	-5.0	
10	-5.2	-5.2	
20	-4.8	-4.8	
30	-4.0	-4.0	
40	-3.0	-3.2	
50	-2.3	-2.3	
60°	-1.4"	-1.4"	

Анализ показал, что смещение подвески описывается выражением

$$y = a + b \cdot \cos Z, \quad (3.6)$$

причем отклонения от этого закона при $Z \geq 15^\circ$ не превышают $\pm 0.3''$. В табл.3.3 приведены параметры выражения (3.6), найденные в разные даты с разной аппаратурой в ПФ БТА.

Таблица 3.3. Параметры смещения подвески Z

$$y = a + b \cdot \cos Z.$$

Дата	a	b
14.03.1992		
I-2 сет	+3.0"	-8.3"
Дебаланс+2	+1.5	-7.1
15.03.1992		
I сет	+2.3	-6.1
17.06.1992		
I сет	+5.9	-6.3
2 сет	+5.4	-5.9
14.07.1992		
I сет	+6.2"	-7.1"

Данные табл.3.3 показывают, что параметры выражения (3.6), описывающие продольный сдвиг подвески Z с изменением положения трубы, достаточно стабильны (нуль-пункт датчика перемещений не фиксирован). При $Z \leq 15^\circ$ закон косинуса нарушается, отклонения от него при этом имеют как систематический характер, так и случайный разброс, но оба эффекта не превышают по амплитуде $1'' - 2''$. В целом, анализ этих данных показывает, что продольный сдвиг подвески Z должен проявляться в ΔZ -составляющей ошибок наведения выражением (3.6) с амплитудой $\sim 7''$, а также сдвигами нуля-пункта и повышенным разбросом измерений при $Z \leq 15^\circ$ в пределах $\sim \pm 2''$.

Возвращаясь к данным табл.3.1, можно видеть, что значения параметра гнуптия трубы d изменяются в широких пределах $-10'' \leq d \leq 10''$, чему даже при учете неопределенности решения системы (3.2) трудно найти физическое объяснение. Введя в условные уравнения косинусоидальный член, получим аналогичное (3.1) выражение

$$\Delta = \Delta Z_0 + d \cdot \sin Z + d_1 \cdot \cos Z + \cos \varphi \cdot \sin A \cdot \Delta S. \quad (3.2')$$

В табл.3.4 приведены соответствующие решения для ряда дат. Разброс данных табл.3.4 и большие ошибки параметров находят объяснение в характере системы (3.2'), как и в случае системы (3.1).

Таблица 3.4. Решения системы (3.2'),
 ПФ БТА без корректора.

Дата	ΔZ_0	d	d1	ΔS
25.08.1988	-10" ±5	18" ±3	13" ±4	-3" ±1
22.03.1989	-23 ±4	15 ±3	27 ±4	4 ±1
16.06.1990	-7 ±10	18 ±8	7 ±7	7 ±5
04.03.1991	-29" ±12	21" ±8	29" ±10	2" ±1
Среднее		18" ±2	18" ±7	

Однако неожиданным результатом оказывается большая амплитуда косинусоидального члена, более чем вдвое превосходящая ожидаемую из линейного перемещения подвески Z. В тоже время амплитуда синусоидального члена в табл.3.4 оказывается близкой к ожидаемой из неоднократных прямых измерений смещения переднего кольца и кабины относительно оправы зеркала, дававших амплитуду этого эффекта ~ 15".

Таким образом, измеряемое смещение подвески Z, являющееся следствием развившегося в ней упругого люфта и переменного остаточного дебаланса трубы, в состоянии объяснить плавание нуль-пункта и разброс данных при $Z \leq 15^\circ$ в пределах $\pm 2''$, наличие которых иллюстрируют рис.3.4 и 3.5. Однако объяснение амплитуды косинусоидального члена в (3.2') и его возможной переменности требует привлечения дополнительного механизма.

На рис.3.6 представлены измеренные дифференциальные гнутия в системе гид БТА - фокус N2 при отключенном механизме компенсации дифференциальных гнутий в узле вторичного зеркала гида. Дифференциальные сдвиги на рис.3.6 не могут быть представлены выражением вида $a + b \cdot \sin Z$, но хорошо аппроксимируются выражением вида $y = 84'' - 43'' \cdot \cos Z$, либо выражением

$$y = 134'' - 32'' \cdot \sin Z - 85'' \cdot \cos Z.$$

В следующей таблице даны значения d и d1 для фокуса N2 в 1992 г.

Дата	13.07.	14.07.	11.08.	12.08.	Среднее
ΔZ_0	-32"	-45"	-30"	-63"	-43" ± 13"
d	13	15	10	23	15 ± 5
d1	21	31	17	42	28 ± 10

Differential bending
focus N2, 21.02.1992

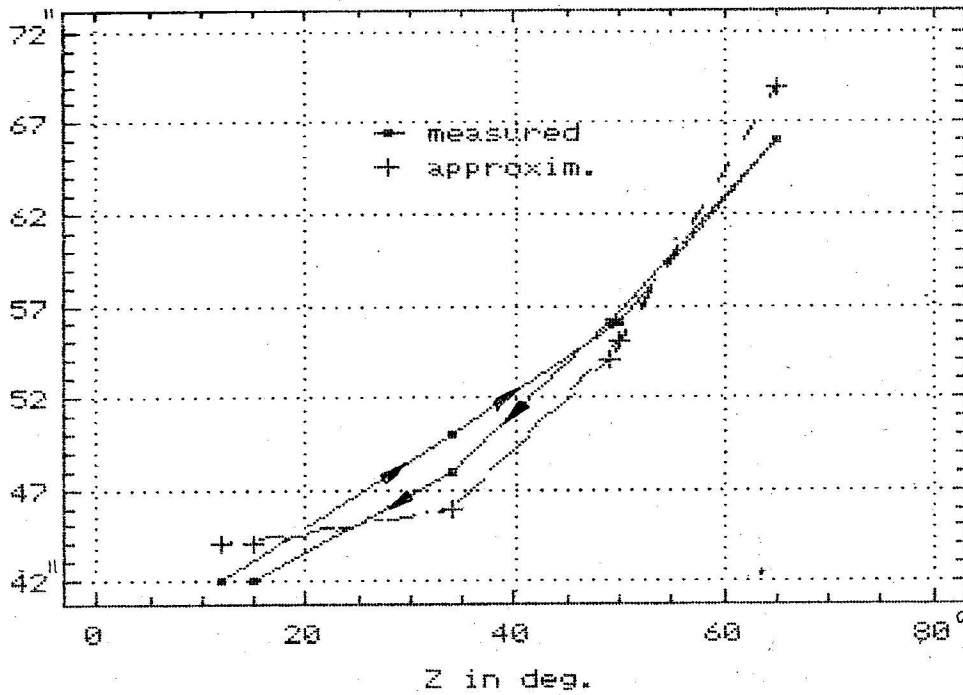


Рис.3.6. Измеренные дифференциальные гнутя в системе гид - первичный фокус БТА, при отключенном механизме компенсации гнутий.

Differential bending, 1.8.1991
 - prime focus, - focus N2

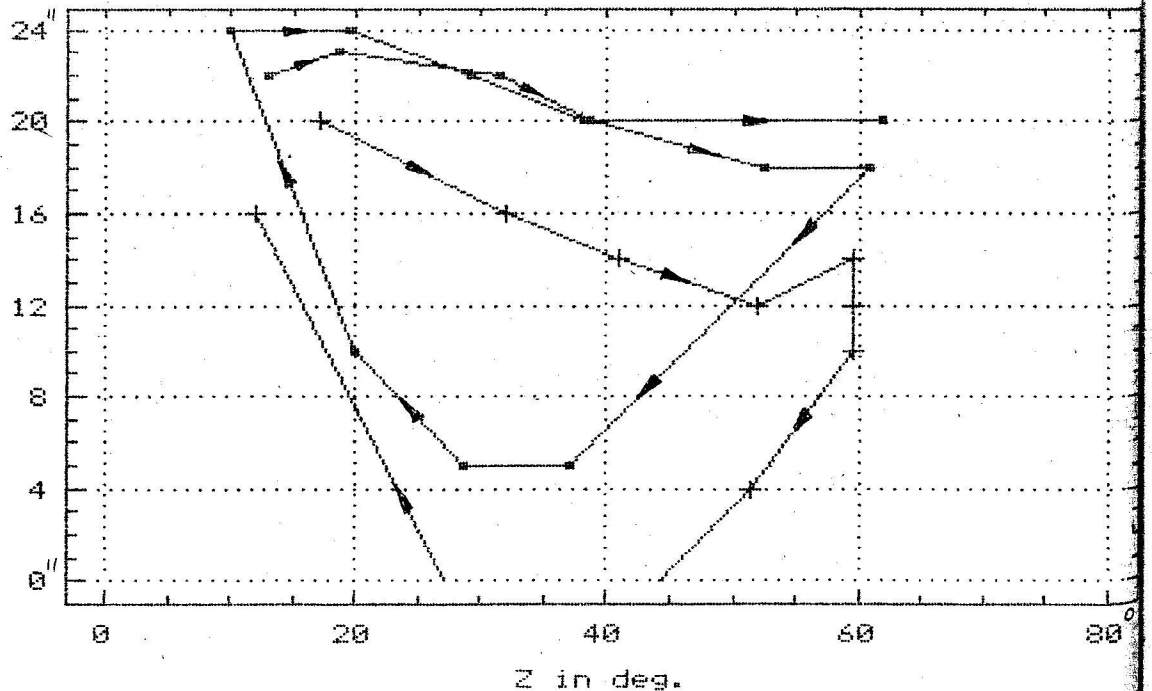
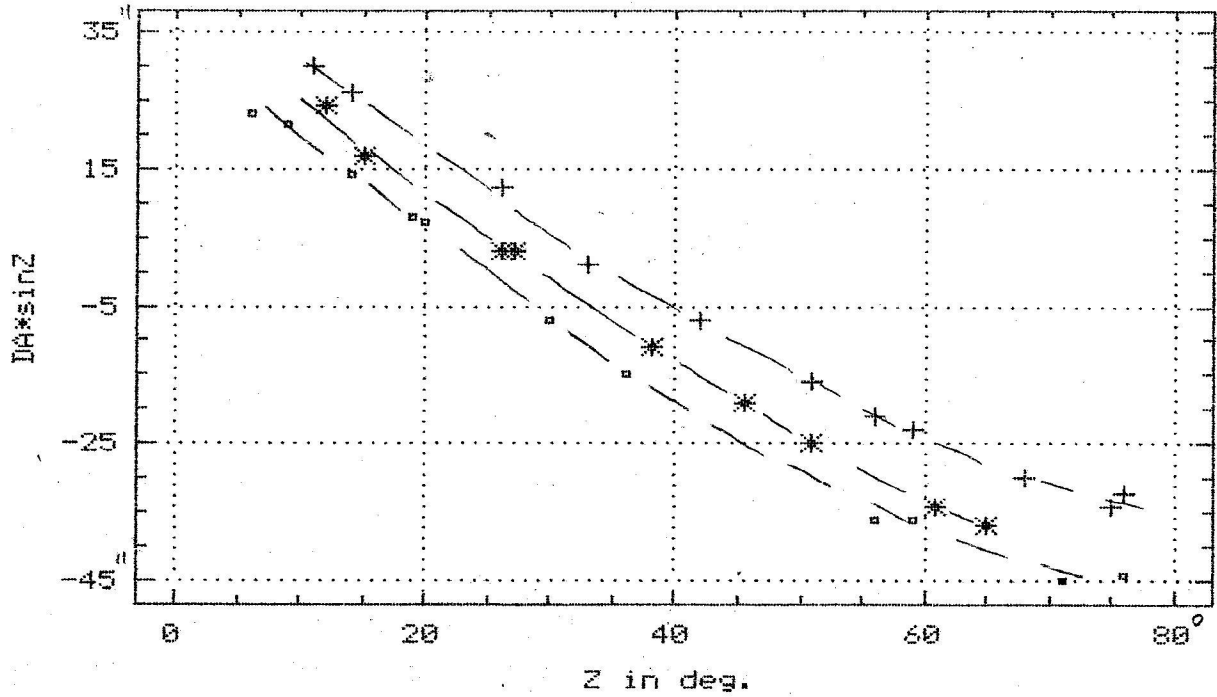


Рис.3.7. Дифференциальные гнутя в системе гид - ПФ и гид - фокус N2. Стрелки означают направление

движения трубы.

Pointing errors in 3 focii of BTA

* - p.f. 27.7.90, ■ - N1 7.9.92, + - N2 11.8.92



Pointing errors in 3 focii BTA

* - p.f. 27.7.90, ■ - N1 7.8.92, + - N2 11.8.92

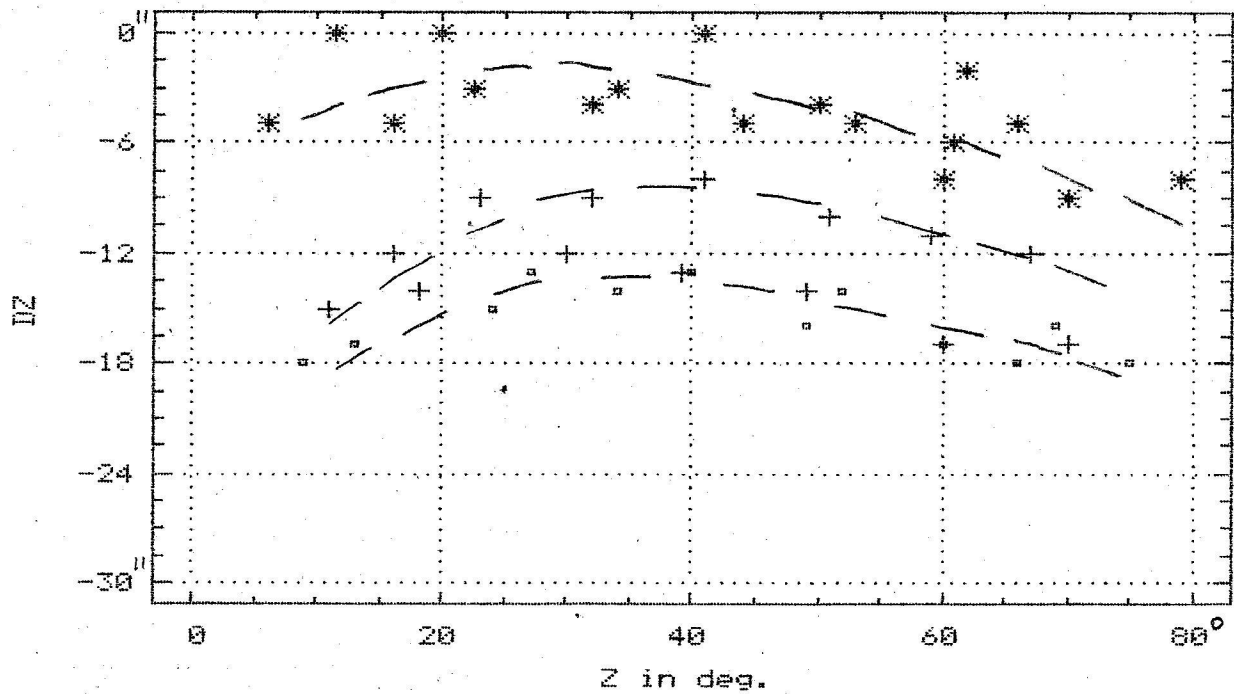


Рис.3.8. Поле ошибок наведения в трех фокусах БТА.

Для $\Delta\gamma$ -составляющей азимут $A = \pm 90^\circ$,

для ΔZ -составляющей $A = 0$ и 180° .

Представив последнее выражение для y в виде:

$$y = 50'' - 2 \cdot (-42'' + 16'' \cdot \sin Z + 42.5'' \cdot \cos Z),$$

получаем, что параметры в скобках близки к средним значениям параметров таблицы, что подтверждает реальность и доминирование косинусоидального члена в ΔZ -составляющей поля ошибок наведения. К сожалению, мы не можем выделить отдельно гнущия трубы гида БТА, узел вторичного зеркала которого расположен на гибкой диафрагме. На рис.3.7 представлены дифференциальные сдвиги в системе гид БТА - ПФ и гид - фокус N2. Здесь отметили для дальнейшего обсуждения, что кривые для первичного фокуса и для фокуса N2 отличаются только сдвигом, тогда как форма кривых на рис.3.7 совершенно одинакова. Можно видеть, что механизм компенсации работает только при ходе трубы вниз, тогда как при ходе трубы вверх отсчет изменяется скачком. Именно этот дефект ограничивает применение телегида БТА в задачах наведения, не позволяя использовать его малое поле. Поэтому восстановление компенсации совершенно необходимо, а ужесточение узла вторичного зеркала гида даст возможность прямых измерений деформаций трубы БТА.

В простейшей трактовке основной принцип конструкции трубы Серюрье состоит в одинаковом смещении оправы зеркала и переднего кольца, при сохранении их взаимного расположения [I8]. В этом случае эффекты гнущия в первичном фокусе могут быть в значительной степени компенсированы, остаточное гнущие будет пропорционально изгибающему моменту $\sim P \cdot \sin Z$. Однако при этом в фокусах Нэсмита гнущия трубы Серюрье проявятся в полной мере, ввиду смещения визирной оси трубы относительно неподвижного приемника. В другом предельном случае, когда передняя (относительно средника) часть трубы обладает абсолютной жесткостью, а оправа с зеркалом испытывает только наклон из-за деформации штанг под действием сжимающего момента, эффекты деформации трубы будут одинаковы в первичном фокусе и в фокусах Нэсмита и пропорциональны $\sim P \cdot \cos Z$. На рис.3.8 показаны поля ошибок наведения для первичного фокуса и фокусов Нэсмита N1 и N2. Можно видеть, что $\Delta \gamma$ -составляющие показывают только сдвиг при сохранении формы, то-есть отличаются лишь значением коллимационной ошибки k в (3.1). Достаточно удивительным является подобие кривых ΔZ -составляющей для первичного фокуса и фокусов Нэсмита, отличающихся в основном тем же постоянным коллимационным сдвигом при сохранении формы кривых. Эти данные показывают, что деформации трубы БТА далеки от таковых для идеальной конструкции Серюрье, что приводит к появлению косинусоидального члена в ΔZ -составляющей поля

ошибок наведения (этот вывод подтверждается данными рис.3.6 и 3.7).

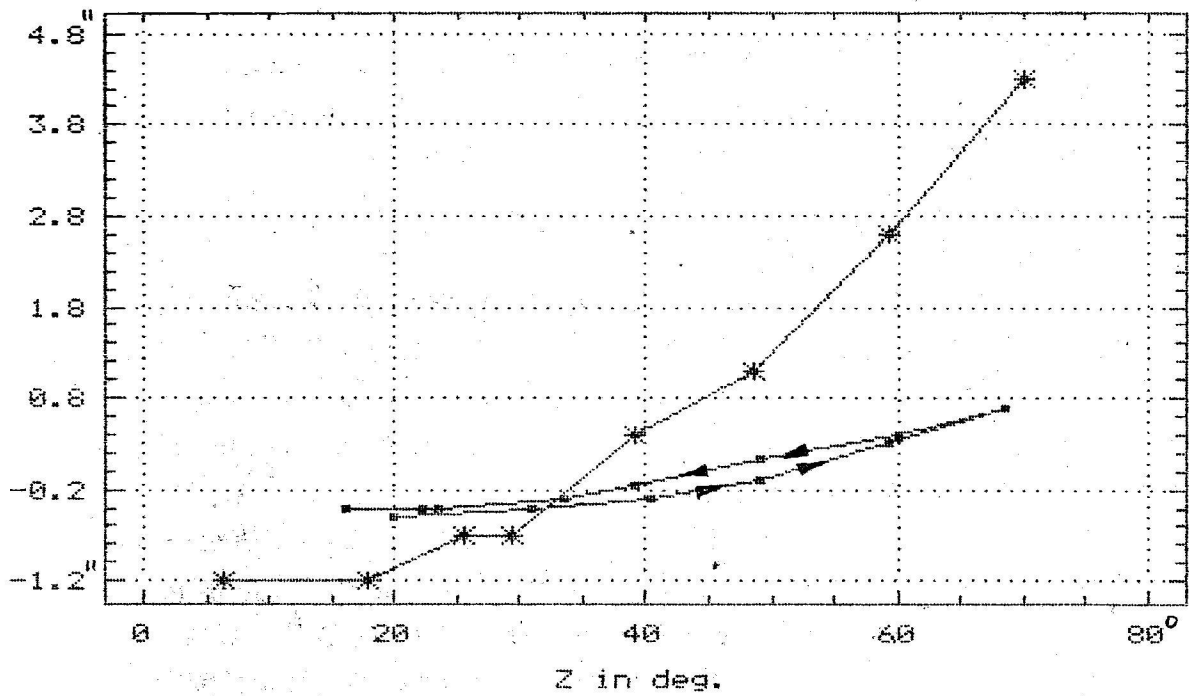
Анализ полей ошибок наведения выявил ряд эффектов и нестабильностей, не учитываемых как в программной, так и в аппаратной части СКН. Часть нестабильности и переменности параметров ΔZ -составляющей объясняются нежесткостью и люфтами в подвеске Z , остаточным дебалансом трубы, ее деформациями. Однако не исключено наличие других механизмов, генерирующих нестационарность, так как анализ данных за весь период исследований в 1984 - 1992 годах не исключает вывода о развитии со временем амплитуды косинусоидального члена в (3.2'), особенно после эксплуатации в течение полугода телескопа с большим дебалансом трубы, возникшем после демонтажа сборки-22 гида БТА в 1989 году. Для оценки влияния и возможности исключения продольного смещения подвески Z 13.07.1992 г. подвеска была зажата болтами. На рис.3.9 представлены результаты этого эксперимента, в сравнении со штатным положением подвески 14.07.1992 г. Можно видеть, что амплитуда смещения подвески снизилась до 1" по сравнению со штатным вариантом, однако вид кривой ΔZ -составляющей практически не изменился, сдвиг же на $\sim 5''$ мог возникнуть при зажатии подвески (10 мкм смещения дают поворот оси на $0.7''$). Этот эксперимент показал, что включением в СКН измерений смещения подвески Z не решить полностью проблему ΔZ -составляющей поля ошибок наведения. Анализ узла Z и механизма автоматической балансировки трубы должны быть продолжены, что требует и задача улучшения динамических характеристик БТА.

В целом, несмотря на отмеченные нестабильности, амплитуды которых лежат в пределах $2'' - 3''$, подтверждается возможность коррекции наведения простым аналитическим выражением для ΔZ -составляющей. Исследование остаточных ошибок этой коррекции позволит окончательно решить и задачу отождествления механизмов возникновения нестабильностей в поле ошибок наведения БТА.

3.3. Ошибка часового угла.

Как показывают данные табл.3.1, в поле ошибок наведения БТА всегда присутствует "ошибка времени" ΔS с амплитудой до $8''$. На рис.3.10 представлено проявление этой составляющей в поле ошибок: максимальное смещение разного знака в южной и северной частях меридиана для $\Delta \gamma$ -составляющей и в западном и восточном вертикалах для ΔZ -составляющей. Объяснение этого эффекта наклоном вертикальной оси не представляется возможным, поскольку прямые измерения и

Displacement of the unit Z
 ■ - unit Z fixed, * - unit Z free



Pointing errors
 ■ - unit Z fixed, * - unit Z free

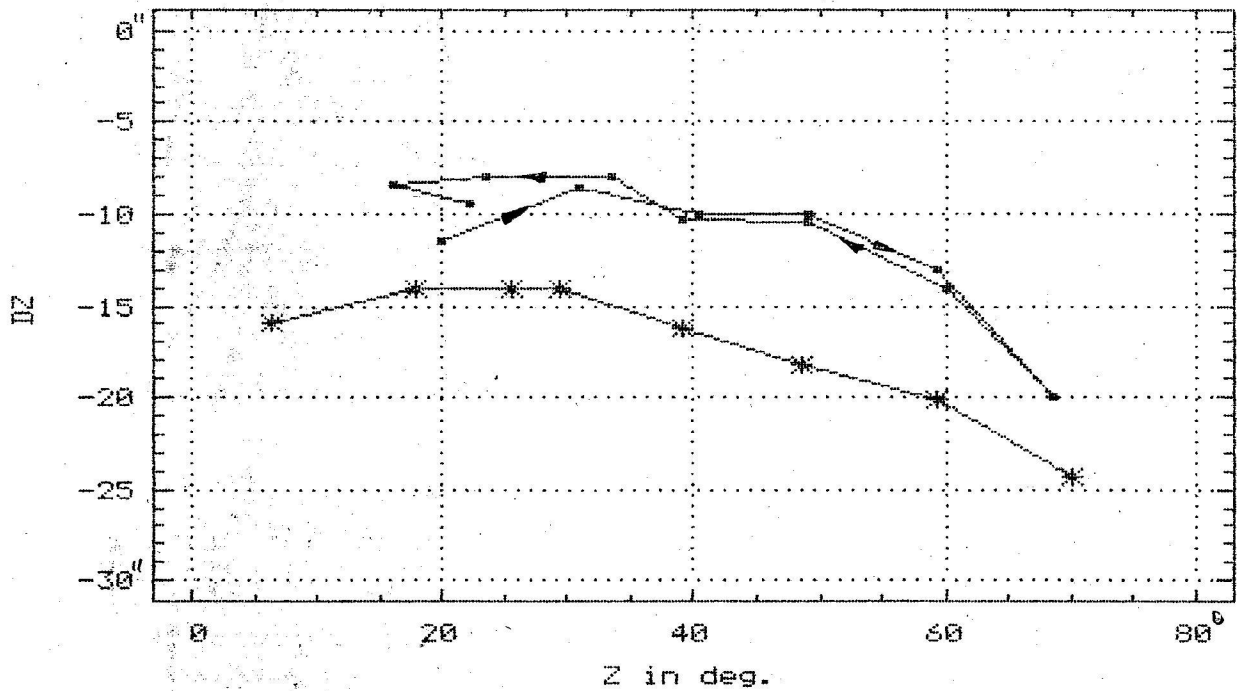
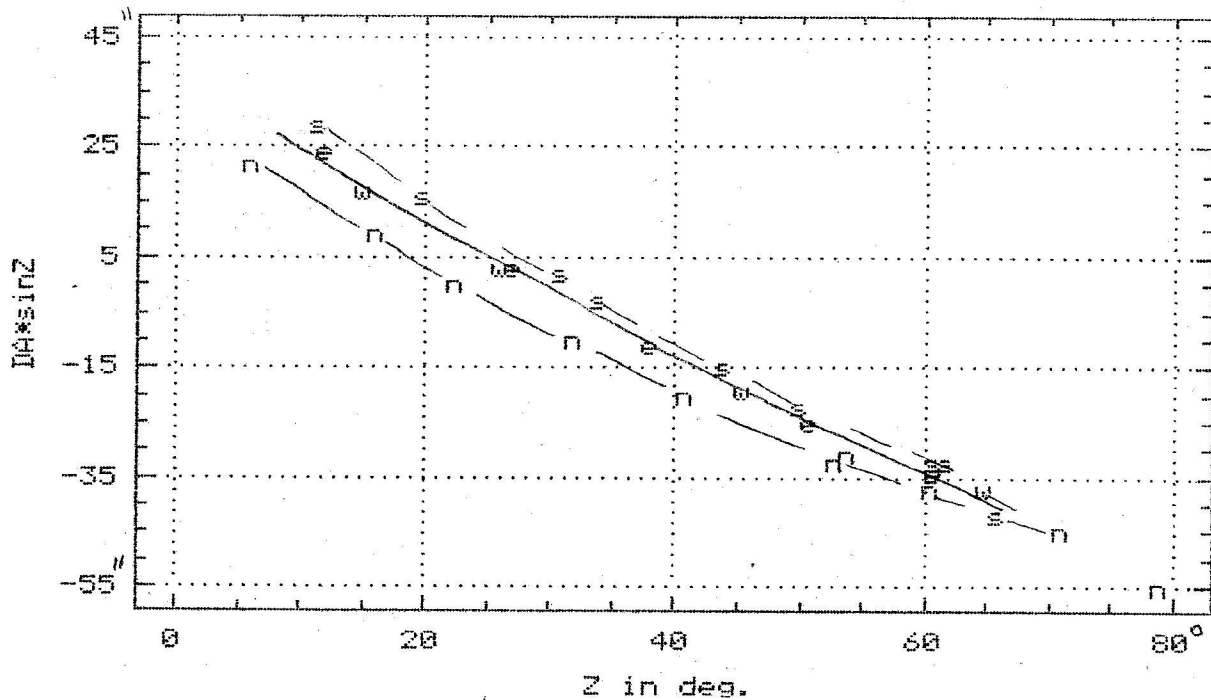


Рис.3.9. Вверху - смещения подвески Z, зажатой болтами 13.07.1992 г. и в штатном режиме 14.07.1992 г. Внизу - соответствующие ΔZ -составляющие поля ошибок наведения при $A \cong 0$.

Pointing errors
prime focus, 27.07.1990



Pointing errors
prime focus, 27.07.1990

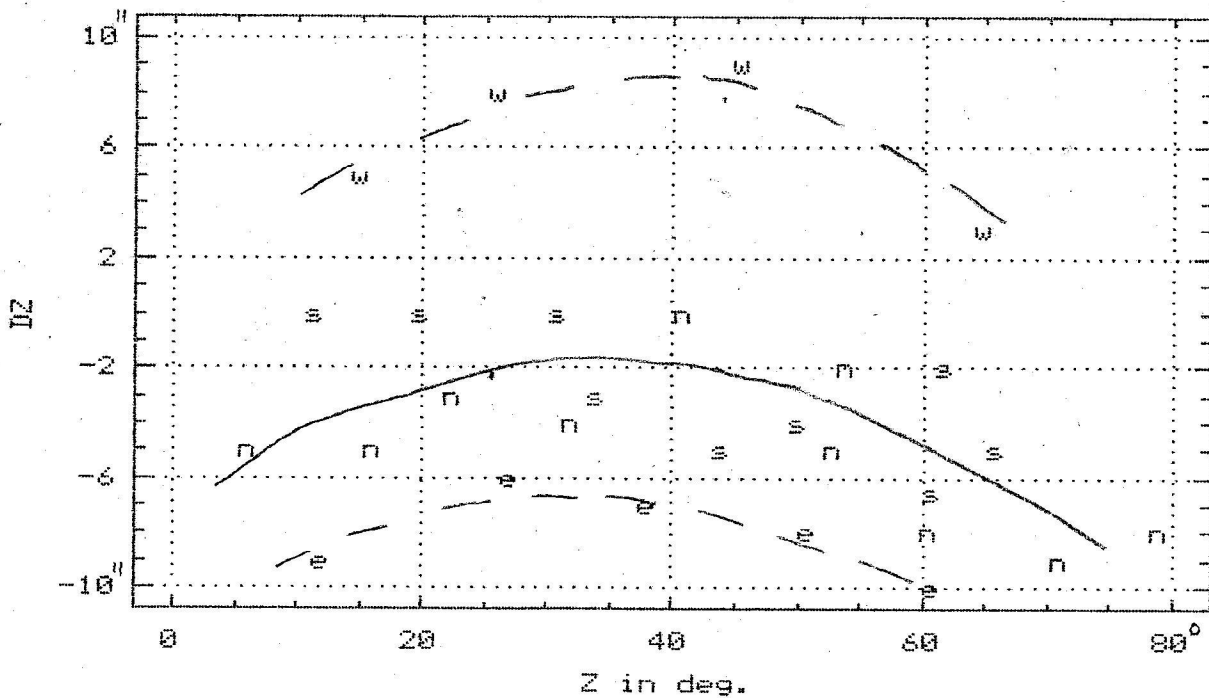


Рис.3.10. Иллюстрация проявления ошибки часового угла в поле ошибок наведения. Значки s,n,w,e обозначают наблюдения соответственно в меридиане и в I-ом вертикале.

постоянный контроль не допускают отклонений от вертикальности с требуемой амплитудой до $8''$. Таким образом, представленные на рис.3.10 систематические сдвиги являются следствием ошибки в часовом угле, постоянной для всех звезд наблюдательной программы. Анализ всех параметров, входящих в счет часового угла, дал следующие результаты.

1. Контрольные измерения в 1986 - 92 гг. подтвердили вывод о стабильности положения вертикальной оси в пределах отклонений от вертикали $\pm 1.5''$, включая биения оси и долговременные изменения.

2. Счет звездного времени в управляющей программе выполняется с точностью не хуже 0.05 сек., нет и фазовых задержек при расчете целеуказаний.

3. Два независимых определения астрономических координат БТА по I-му классу точности дали отклонения $\Delta\lambda = 0.1 \text{ сек.} = 1.5''$ и $\Delta\phi = 0.4''$, то-есть ошибка в долготе места не может внести в часовой угол ошибку более $1.5''$.

4. Ошибки в координатах звезд, выбираемые из каталога видимых мест звезд Астрономического Ежегодника, даже без учета короткопериодических членов нутации не превышают $\pm 0.2''$.

Таким образом, анализ возможных внутренних ошибок часового угла показывает, что они не могут превышать $\pm 2''$, включая ошибку наклона вертикальной оси телескопа и неопределенность астрономической долготы места. Наблюдаемые крупные ошибки часового угла $\Delta S \geq 2''$ скорее всего возникают при привязке к мировому времени в службе времени БТА. Здесь анализ уже носит детективный характер, осложняемый тем, что в 1986 - 89 гг. в наблюдения вводилась часто не зафиксированная поправка времени, определяемая методом проб из наблюдений пар звезд в I-ом вертикале. Сейчас можно лишь подозревать, что крупные ошибки времени в 1984 - 90 гг. возникали при привязке к радиосигналам координированного времени UTC без учета "окраски" сигнала, либо из-за ошибок в счетной процедуре привязки координированного времени к мировому $\Delta T = UT1 - UTC$. В 1991 - 92 гг. ошибка часового угла стабилизировалась на уровне $2''$, то-есть близка к минимальной.

4. ПРОЦЕДУРА ИСКЛЮЧЕНИЯ ОШИБОК НАВЕДЕНИЯ БТА

Суммируя приведенные выше данные о нестабильности поля ошибок наведения и выявленных механизмах ее возникновения, получаем следующие оценки нижних пределов ошибок наведения БТА.

В $\Delta\gamma$ -составляющей ошибок наведения нестабильность определяется:

- гистерезисом качания главного зеркала в оправе с размахом $\pm 1''$;
- ошибкой задания часового угла с размахом $\leq \pm 2''$, где главную роль играет неопределенность положения вертикальной оси.

Параметры средней геометрии для $\Delta\gamma$ -составляющей стабильны на протяжении нескольких лет.

В ΔZ -составляющей ошибок наведения нестабильность определяется:

- качанием главного зеркала в оправе с размахом $\pm 1''$;
- ошибкой задания часового угла с размахом $\pm 2''$;
- нестабильностью в подвеске Z (упругие люфты, переменный остаточный дебаланс и др.) с размахом $\pm 3''$.

Параметры средней геометрии для ΔZ -составляющей достаточно стабильны на протяжении нескольких лет, с возможной переменностью амплитуды косинусоидального члена.

Все это позволяет дать очень высокую оценку проекту и качеству изготовления основных узлов монтировки БТА, кроме узла подвески Z с механизмом автоматической балансировки трубы. Малый суммарный размах ошибок наведения, не устранимых учетом ошибок геометрии телескопа (наклоны осей и т.д.), составляющий $|\Delta\gamma| \leq 3''$ и $|\Delta Z| \leq 5''$, позволяет применить чисто программный алгоритм исключения ошибок наведения. Отметим и здесь, что большинство указанных источников нестабильности не учитывается в программной части СКН и не измеряется в ее аппаратной части (либо не может быть измерено из-за низкого разрешения датчиков геометрии). В программный алгоритм исключения ошибок наведения мы включили следующие составляющие:

$$\Delta\gamma = \Delta A \cdot \sin Z = \begin{aligned} & + \sin Z \cdot \Delta A_0 && \text{поправка нуль-пункта} \\ & + \cos Z \cdot L && \text{наклон горизонтальной оси} \\ & + k && \text{коллимационная ошибка (4.I)} \\ & + (\sin\varphi - \cos Z \cdot \sin\delta) \cdot \operatorname{cosec} Z \cdot \Delta S && \text{ошибка часового угла} \\ & - \sin A \cdot \cos Z \cdot F && \text{широтная ошибка вертикальной оси} \end{aligned}$$

$$\Delta Z = \begin{aligned} &+ \Delta Z_0 && \text{ошибка нуль-пункта} \\ &+ \sin Z \cdot d && \text{гнутые трубы} && (4.2) \\ &+ \cos Z \cdot d_1 && \text{косинусоидальный член гнутия} \\ &+ \cos \varphi \cdot \sin A \cdot \Delta S && \text{ошибка часового угла} \\ &+ \cos A \cdot F && \text{широтная ошибка вертикальной оси} \end{aligned}$$

Нужно отметить, что названия поправок приведены по очевидным традиционным составляющим, но фактически каждая поправка является суммой нескольких эффектов. С учетом этого обстоятельства, а также из-за неопределенности решения системы (4.1) - (4.2) методом наименьших квадратов, при замене параметров необходимо заменять всю систему параметров, при ее обновлении или при получении одной из составляющих из прямых измерений.

4.1. Иллюстрация эффективности системы поправок (4.1) - (4.2).

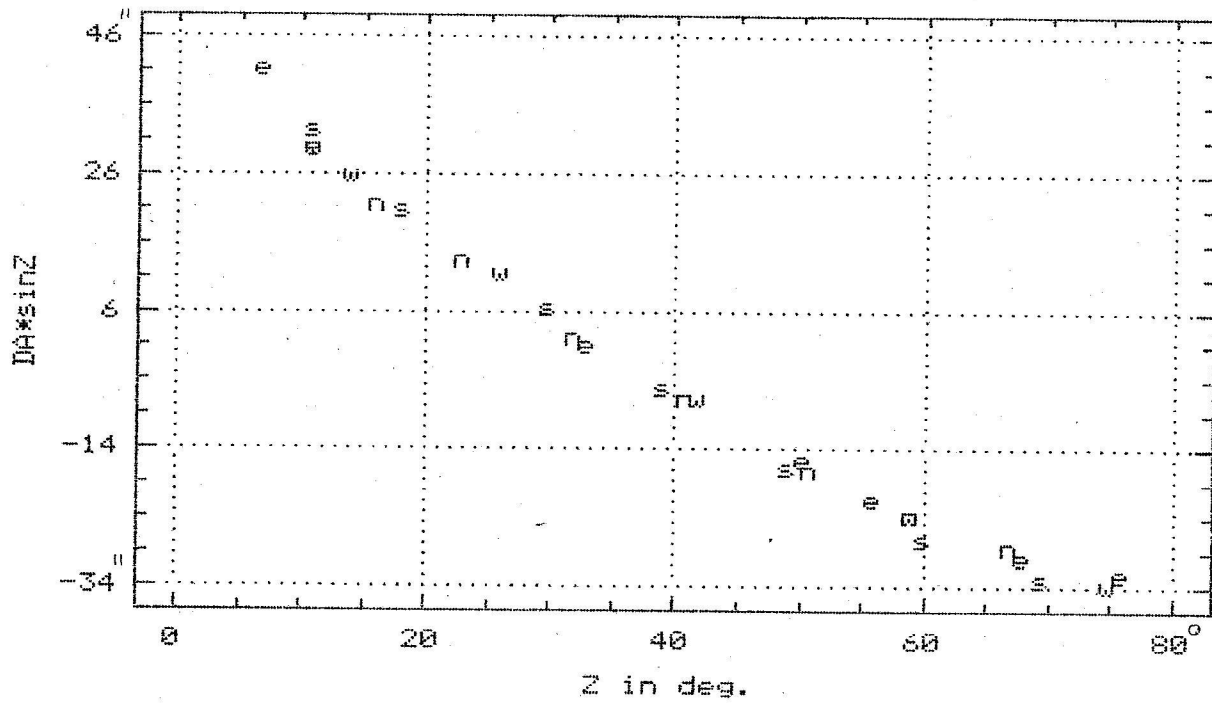
На рис.4.1 представлено поле ошибок наведения в фокусе N2, полученное 11.08.1992 г. Наведения осуществлялись с помощью телегида ОЗСП, отсчеты ошибок наведения считывались с экрана терминала по накопленным значениям коррекции. Можно видеть систематические различия значений ошибок наведения в различных вертикалах, иллюстрирующие наличие ошибки часового угла, а так же сдвиг значений ΔZ в южной части меридиана относительно таковых для северной. Последнее и вызвало необходимость введения широтной составляющей наклона вертикальной оси телескопа.

На рис.4.2а показаны остаточные невязки при исключении поправок "средней геометрии" системой (3.1) - (3.2'). Размах остаточных ошибок в этом случае составляет $h_y \cong \pm 3''$ и $h_z \cong \pm 4''$, среднеквадратичные остаточные ошибки составляют $\sigma_y \cong \pm 1.7''$ и $\sigma_z \cong \pm 2.3''$. В тоже время виден систематический параболический ход в ΔZ и систематические различия в значениях остаточных ошибок для различных вертикалов.

На рис.4.2б показаны результаты исключения поправок системой (4.1) и (4.2), но при $\Delta S = F = 0$. Можно видеть, что введение косинусоидального члена исключило параболическую систематику в ΔZ , в тоже время в остаточных отклонениях отчетливо видно проявление ошибки часового угла и широтной ошибки. Размах остаточных ошибок в этом случае составляет $h_y \cong h_z \cong \pm 3''$, среднеквадратичные остаточные ошибки $\sigma_y \cong \pm 2.1''$ и $\sigma_z \cong \pm 1.5''$.

На рис.4.2в показаны результаты исключения поправок полной системой (4.1) и (4.2). Размах распределения остаточных

Pointing errors 11.08.1992
focus N2



Pointing errors 11.08.1992
focus N2

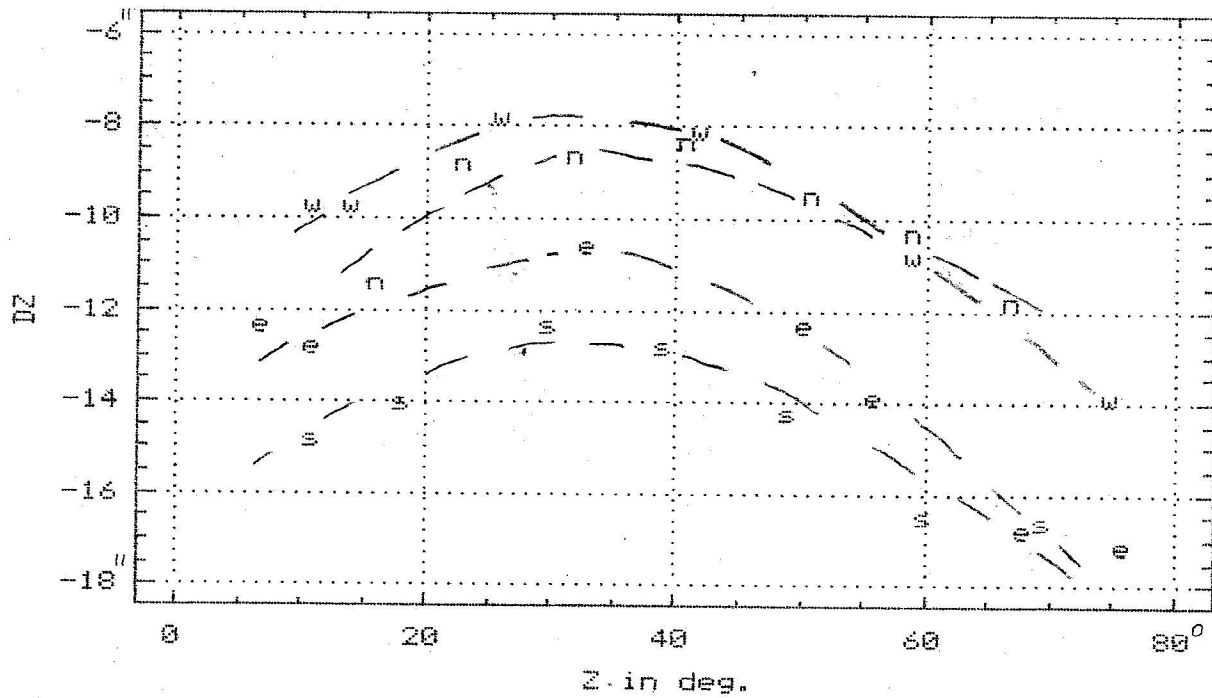
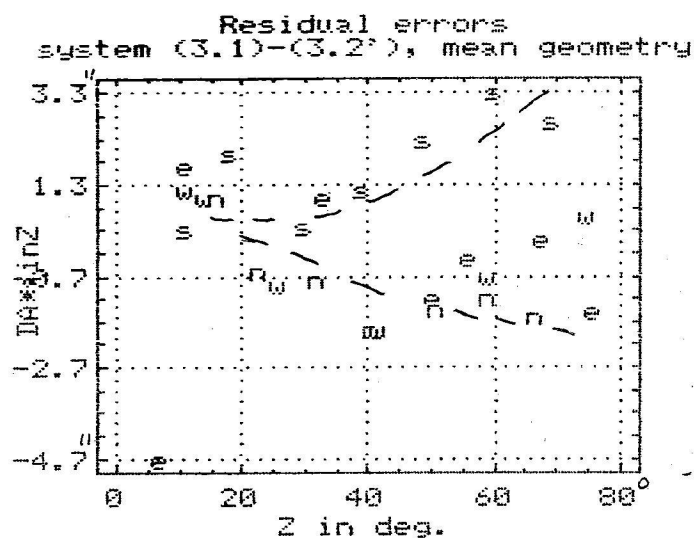
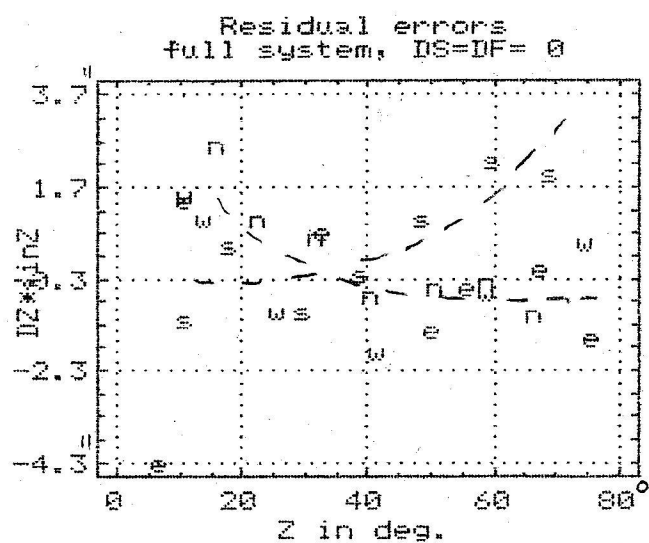
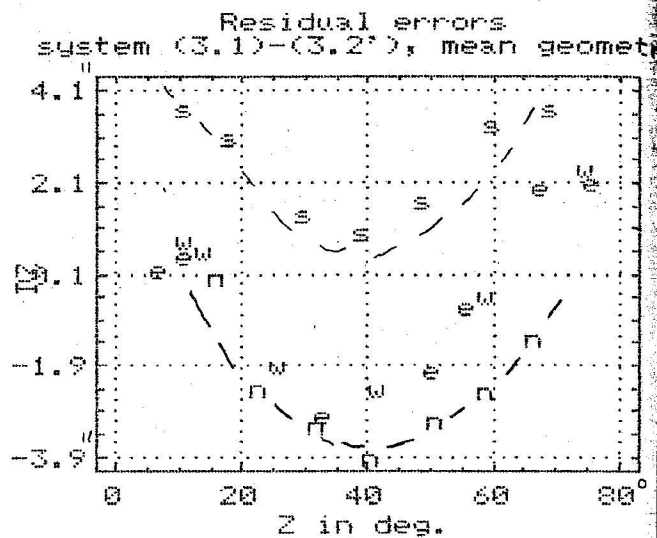


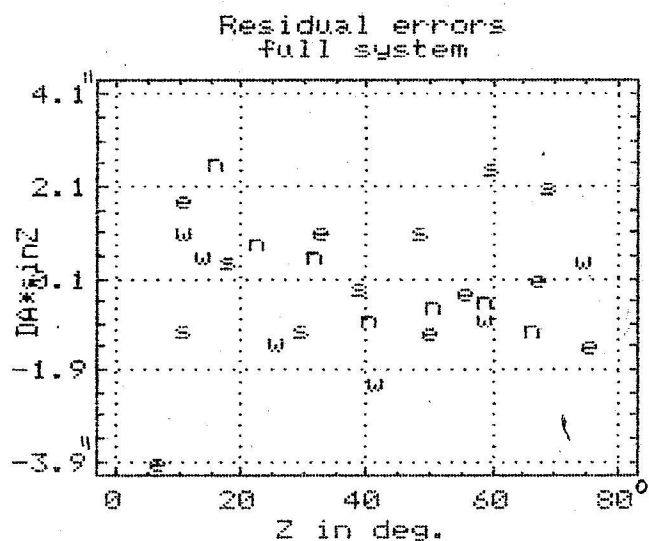
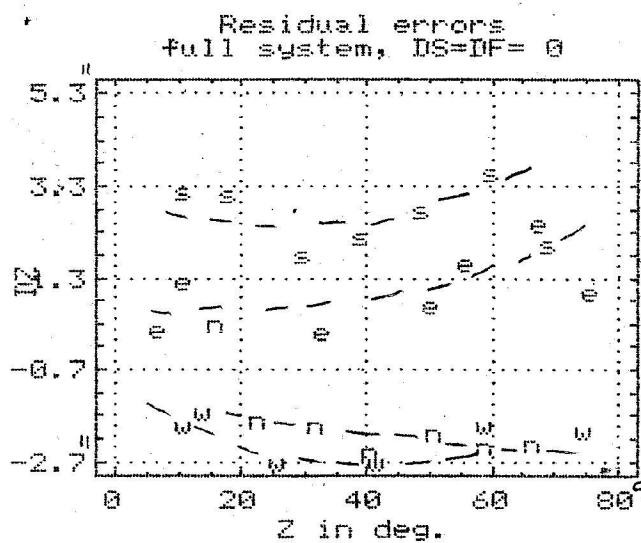
Рис.4.1. Поле ошибок наведения в фокусе N2 11.08.1992 г.



a.



b.



b.

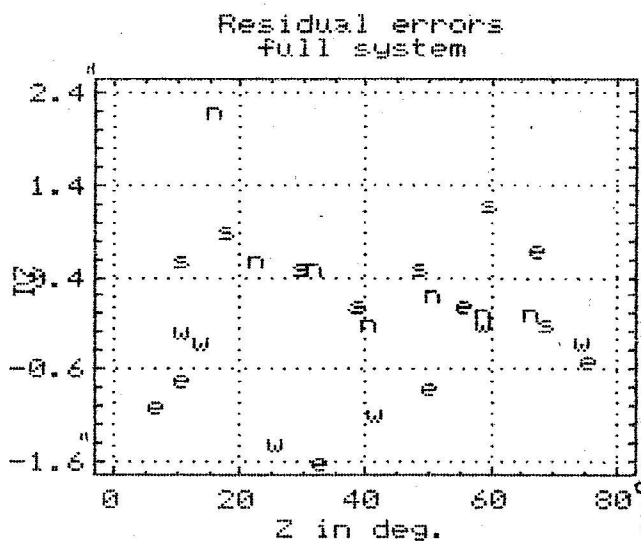


Рис.4.2. Остаточные ошибки редукции поля ошибок рис.4.1.
 а. - система поправок (3.1)-(3.2),
 б. - система поправок (4.1)-(4.2) при $\Delta S = F = 0$,
 в. - полная система (4.1)-(4.2).

уклонений в этом случае составляет $h_\gamma \cong \pm 2.5''$ и $h_z \cong \pm 2''$, среднеквадратичные уклонения $\sigma_\gamma \cong \pm 1.4''$ и $\sigma_z \cong \pm 0.8''$. Таким образом, система поправок (4.1) и (4.2) свела в данную ночь распределение остаточных уклонений к нижнему пределу ошибок наведения, определяемому гистерезисом качания зеркала в оправе, нестабильностью в подвеске Z, ошибками установки звезды в центр поля и т.д.

Для иллюстрации долговременной стабильности системы поправок приведем пример обработки данных в одну дату с системой параметров (4.1) - (4.2), полученных в другую дату.

1. Обработка полей ошибок наведения для первичного фокуса БТА с системой (4.1) - (4.2) дала следующие характеристики распределения остаточных уклонений для двух дат различных лет.

Дата	6.08.87	4.03.91
h_γ	$\pm 3''$	$\pm 2''$
σ_γ	± 1.7	± 1
h_z	± 2	$\pm 3''$
σ_z	$\pm 1''$	$\pm 1.7''$

Исключая из данных за 6.08.1987 г. поправки наведения с системой параметров за 4.03. 1991 г., положив в них очевидно переменные параметры $\Delta S = F = 0$, получим следующие характеристики распределения остаточных невязок:

$$h_\gamma \cong \pm 5'', \quad \sigma_\gamma \cong \pm 2.7'',$$

$$h_z \cong \pm 5'', \quad \sigma_z \cong \pm 2.8''.$$

2. Аналогично для фокуса N2 имеем следующие характеристики распределения остаточных уклонений для трех дат:

Дата	6.08.87	14.07.92	11.08.92
h_γ	$\pm 2''$	$\pm 2''$	$\pm 2.5''$
σ_γ	± 1.1	± 1.3	± 1.4
h_z	± 1.5	± 2	± 2
σ_z	$\pm 0.7''$	$\pm 1''$	$\pm 0.8''$

Исключая из данных за 11.08.1992 г. поправки с параметрами за 14.07.1992 г., получим характеристики распределения остаточных уклонений:

$$h_\gamma \cong \pm 6'', \quad \sigma_\gamma \cong \pm 2.7'',$$

$$h_z \cong \pm 5'', \quad \sigma_z \cong \pm 2.5''.$$

Наконец, исключая из данных за 6.08.1987 г. поправки с параметрами за 14.07.1992 г., положив в них $\Delta S = 0$, получим характеристики

распределения остаточных уклонений:

$$\begin{aligned} h_\gamma &\cong \pm 4'', & \sigma_\gamma &\cong \pm 2.4'', \\ h_z &\cong \pm 7'', & \sigma_z &\cong \pm 4.2''. \end{aligned}$$

Приведенные примеры количественно иллюстрируют достаточную полноту системы (4.1) - (4.2) для описания реальных полей ошибок наведения, сводящей размах распределения остаточных уклонений в данную ночь до уровня физического предела определенности решения. Приведенные примеры иллюстрируют также долговременную стабильность параметров геометрии телескопа. Переменность параметров ΔS и F , значения которых в 1992 году малы - не превышают $2''$, требует для понимания ее природы накопления новых рядов наблюдений.

4.2. Алгоритмы программного исключения ошибок наведения.

Изложенное выше показывает, что система поправок (4.1) - (4.2) достаточно полно описывает поля ошибок наведения. Этот алгоритм программного исключения ошибок наведения, дополненный простыми наблюдательными процедурами, позволяет достичь следующих точностных характеристик наведения БТА.

1. Использование одной и той же системы параметров для данного фокуса (при $\Delta S = F = 0$) уже обеспечивает среднеквадратичную ошибку наведения по обеим координатам $\sigma \leq 3''$ с размахом $h \leq \pm 6''$ на протяжении нескольких лет. (4.3)
2. Уточнение/определение параметров ΔS и F наблюдениями 2-х пар звезд на равных высотах в меридиане и I-ом вертикале приводит к снижению ошибок наведения к значению $\sigma \leq 2.5''$ с размахом $h \leq \pm 5''$ на протяжении нескольких дней (недель ?). (4.4)
3. Для достижения точности наведения $\sigma \leq 1.5''$ с размахом $h \leq \pm 2''$ необходимо для данной ночи выполнить наблюдения минимального поля ошибок наведения (4 - 5 точек для $5^\circ \leq Z \leq 70^\circ$ в четырех вертикалах) и переопределить всю систему параметров для данного фокуса БТА. (4.5)

Именно этот полностью программный алгоритм исключения ошибок наведения предлагается включить в управляющую программу новой АСУ и реализуется сейчас на БТА (отладка замедлена отсутствием наблюдений по погодным условиям осенне-зимнего сезона 1992 - 93 г.).

Для уменьшения нестабильностей рассматривается возможность ужесточения требований к балансировке трубы телескопа, а также возможная ревизия механизма автоматической балансировки.

Программный алгоритм позволяет одним наведением на звезду во время профилактики телескопа оценить состояние телескопа и АСУ БТА. При необходимости последующее наведение на 2 звезды на равных высотах в I-ом вертикале дает оценку ошибки времени и, тем самым, исключает ошибки привязки к мировому времени. Включение этих процедур в профилактику исключает конфликтные ситуации, нередко возникающие из-за ошибочного задания координат объектов наблюдательной программы.

4.3. Исключение накопленных ошибок ведения БТА.

В управляющую программу АСУ БТА включена процедура "обратного пересчета" координат объекта, основанная на следующем. При неточном задании координат объекта с ошибками $\Delta\alpha$ и $\Delta\delta$ возникает ошибка наведения [9, II]:

$$\begin{aligned} \Delta\lambda \cdot \sin Z &= \Delta\gamma = (\cos\delta \cdot \cos q \cdot \Delta t + \sin q \cdot \Delta\delta), \\ \Delta Z &= (\cos\varphi \cdot \sin A \cdot \Delta t - \cos q \cdot \Delta\delta). \end{aligned} \quad (4.6)$$

Отсюда находим:

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{о.п.}} = -\Delta\alpha_{\text{о.п.}} &= \frac{ (\Delta\gamma \cdot \cos q + \Delta Z \cdot \sin q) }{ (\cos\delta \cdot \cos^2 q + \cos\varphi \cdot \sin A \cdot \sin q) }, \\ \Delta\delta_{\text{о.п.}} &= \frac{ (\Delta\gamma \cdot \cos\varphi \cdot \sin A - \Delta Z \cdot \cos\delta \cdot \cos q) }{ (\cos\delta \cdot \cos^2 q + \cos\varphi \cdot \sin A \cdot \sin q) }. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Если измеренные ошибки наведения $\Delta\gamma$ и ΔZ вызваны только ошибками в заданных координатах объекта $\Delta\alpha$ и $\Delta\delta$, то процедура обратного пересчета (4.7) просто устранил эти ошибки из координат. Поскольку

$$\Delta t = \Delta S - \Delta\alpha = \Delta S_0 + \Delta UT1 + \Delta\lambda - \Delta\alpha, \quad (4.8)$$

то процедура обратного пересчета устранил и все ошибки задания часового угла t , включая постоянную составляющую наклона вертикальной оси телескопа, но координаты обратного пересчета включают в себя все эти ошибки. Поскольку процедуры исключения ошибок наведения (4.3) и (4.5) отличаются в основном учетом ошибки часового угла, то при различной точности наведения эти процедуры практически равнозначны в точности ведения именно из-за процедуры обратного пересчета.

Из выражений (4.7) следует, что координаты обратного пересчета имеют смысл только для данной точки неба (A, Z) и только для данного фокуса. При использовании их, как привыкли делать наблюдатели, в другой точке неба и тем более в другом фокусе ошибки наведения только возрастают, как и ошибки ведения.

В общем случае, когда остаточные ошибки наведения после коррекции уже не сводятся к ошибкам часового угла и координат объекта, процедура обратного пересчета (4.7) вносит ошибки в заданные координаты объекта. Соответственно возникает ошибка скоростей ведения по A и Z, приводящая к накопленной ошибке ведения [II]:

$$\dot{\Delta A} = \frac{\cos\varphi}{\sin^2 Z} [-\cos\delta \cdot (\sin\varrho \cdot \cos A + \cos\varrho \cdot \sin A \cdot \cos Z) \Delta t + (\cos\varrho \cdot \cos A - \sin\varrho \cdot \sin A \cdot \cos Z)], \quad (4.9)$$

$$\dot{\Delta Z} = \frac{\cos\varphi}{\sin Z} \cos A \cdot (\cos\delta \cdot \cos\varrho \cdot \Delta t + \sin\varrho \cdot \Delta\delta) \quad (4.10)$$

Для полного анализа этих выражений и накопленных ошибок ведения требуется большой объем вычислений. Здесь достаточно привести верхнюю оценку допустимых остаточных ошибок наведения, не вызывающих появления трендов ведения. Положив $\Delta t = \Delta\delta = \Delta''$ и заменяя тригонометрические выражения их максимальными оценками, получим

$$\dot{\Delta A} \leq \frac{\Delta''}{\sin^2 Z} \cdot \frac{24.5}{206265} \text{ об/сутки}, \quad (4.II)$$

$$\dot{\Delta Z} \leq \frac{\Delta''}{\sin Z} \cdot \frac{1.5}{206265} \text{ об/сутки}.$$

Умножив на время экспозиции ΔT сек., необходимое, чтобы накопленная ошибка ведения превысила $0.3''$, получаем оценку:

$$\Delta T_{\gamma} \geq 560 \cdot \frac{\sin Z}{\Delta''} \text{ сек.}, \quad (4.I2)$$

$$\Delta T_Z \geq 9 \cdot 10^3 \cdot \frac{\sin Z}{\Delta''} \text{ сек.}$$

Отсюда следует, что остаточные ошибки наведения $\sigma \leq 1.5''$ не дают заметных трендов ошибок ведения, поскольку даже при сильно завышенных оценках ошибок скоростей (4.II) требуются минуты для

накопления $\Delta\gamma \sim 0.3''$ при $Z \geq 5^\circ$.

Программное исключение ошибок геометрии резко улучшило качество ведения БТА, при этом процедура обратного пересчета приобрела физический смысл действительного устранения ошибок задания экваториальных координат объекта, достигающих на практике для слабых объектов десятков угловых секунд. При программном исключении ошибок наведения системой СКН в реальных наблюдениях уже получены следующие уровни накопленных ошибок ведения (трендов):

ПФ - при экспозиции 20 мин. без гидирования систематические сдвиги изображений на снимке не обнаруживаются (сентябрь 1987 г., наблюдатель Н.А.Тихонов).

N2 - при экспозиции 36 мин. накопленная коррекция составила $\delta Z = +0.5''$ и $\delta\gamma = -0.9''$ (24.08.1989 г., наблюдатель Г.Волкова).

NI - при экспозиции 80 мин. накопленная коррекция составила $\delta Z = +0.6''$ и $\delta\gamma = -0.6''$ (19.08.1989 г., наблюдатель С.Н.Фабрика).

Таким образом, задача устранения трендов в ошибках ведения БТА успешно решается программным исключением ошибок наведения. Для устранения эффектов вращения поля при наблюдениях фактически внеосевых объектов должны быть разработаны методы совмещения оптических осей навесных приборов с визирной осью телескопа.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенный выше анализ качества юстировки, прямых измерений геометрии телескопа и многолетних рядов ошибок наведения позволил сделать следующие заключения.

1. Геометрические характеристики монтировки БТА близки к теоретическим и стабильны на протяжении ~ 10 лет, что позволяет дать очень высокую оценку проекту и качеству изготовления основных узлов и механизмов БТА. Исключением является механизм автоматической балансировки трубы, ставший источником упругого люфта и остаточного дебаланса трубы.

2. Высокая стабильность геометрии БТА позволяет простым программным алгоритмом свести ошибки наведения до уровня $\sigma_{\gamma, z} \leq 3''$ с размахом $\leq \pm 6''$ с одной и той же системой поправок для ряда лет. Уточнением системы параметров для данной ночи ошибки наведения могут быть сведены до уровня $\sigma_{\gamma, z} \leq 1.5''$ с размахом $\leq \pm 2''$.

3. Именно этот программный алгоритм исключения ошибок наведения предлагается включить в управляющую программу новой АСУ БТА, что обеспечивает выполнение современных требований к точности наведения и устранения трендов ведения крупного телескопа.

В работе [19] приведены результаты анализа точности наведения нового 3.5-метрового альт-азимутального телескопа Apache Point Observatory. Привлекая модель ошибок геометрии телескопа, достигнута точность наведения $\sigma \cong 5''$ и накопленная ошибка ведения $0.3''$ за 10 мин. экспозиции. На телескопе реализован абсолютный датчик положения с помощью разделенного круга. Отмечаются нестабильности, связанные с фрикционными силовыми передачами и передачей инкрементального датчика. Сравнение этих данных с таковыми для БТА подчеркивает высокую оценку БТА, данную выше.

Авторы благодарны сотрудникам научных лабораторий, особенно И.Ф.Бикмаеву и Н.А.Тихонову, за помощь в наблюдениях и обсуждение проблем телескопа. Все экспериментальные работы на БТА выполнены сотрудниками СЭК БТА (модернизация гида БТА, измерения нестабильностей, внедрение телегида ОЗСП, программные работы и т.д.). Авторы особенно благодарны за активное участие в работе Ю.М.Маметьева, А.М.Притыченко, Н.А.Викульева, М.Г.Ярохина, В.Г.Данилова, В.Н.Ерохина. Вся работа выполнена в рамках совместной работы САО РАН и ЛОМО (Ю.Б.Шварцман) с участием ЦНИИГАиК (В.Я. Вайнберг) по теме "Модернизация БТА".

ЛИТЕРАТУРА

1. П.Т.Уоллес, Точность наведения и сопровождения англо - австралийского 3.9-метрового телескопа, в кн. Оптические телескопы будущего, с.106, М., Мир, 1981
2. M.Tarengi, The NNT as VLT Precursor, in ESO Conference and Workshop Proc. № 24, 299, 1986
3. D.Enard, The ESO Very Large Telescope. Part 1: Concept, in ESO Conference and Workshop Proc. № 24, 25, 1986
4. JNVLT - Feasibility Study Interim Report, 1987
5. R.N.Martin and J.W.Baars, Submillimeter Telescope Project, in Proc. SPIE, v.1235, 503, 1990
6. Эскизный проект замены и модернизации АСУ БТА, отчет САО, 1992
7. В.Я.Вайнберг и др., Опыт юстировки оптики первичного фокуса БТА, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), т.22, II2, 1986
8. Л.И.Снежко, Исследование качества оптики первичного фокуса БТА, отчет САО, 1983
9. С.М.Виленчик и др., Анализ ошибок макета большого телескопа на альт-азимутальной монтировке, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), т.4, I92, 1972
10. Н.Н.Михельсон, Некоторые вопросы теории альт-азимутальной монтировки телескопа. Часть I. Преобразование координат и особые точки на небе, Изв. ГАО, № I81, 23, 1966
11. Н.Н.Михельсон, Некоторые вопросы теории альт-азимутальной монтировки телескопа. Часть 2. Влияние ошибок исходных данных и погрешностей альт-азимутальной монтировки на точность работы телескопа, Изв. ГАО, № I85, 279, 1970
12. В.Я.Вайнберг, Применение геодезических средств и методов для повышения точности наведения больших оптических телескопов, автореферат канд. дисс., ЦНИИГАиК, 1985
13. В.Я.Вайнберг и С.И.Грызулин, Исследование характеристик вращения и стабильности положения горизонтальной оси БТА, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), т.27/2, 90, 1989
14. В.Я.Вайнберг, Исследование характеристик вращения и стабильности положения I-й (вертикальной) оси БТА, Астрофиз. исслед. (Изв. САО), т.19, 82, 1985

15. В.Я.Вайнберг, Описание и инструкция по эксплуатации системы коррекции наведения (СКН) БТА, архив БТА, 1988
16. С.С.Уралов, Курс геодезической астрономии, М., Недра, 1980
17. Р.В.Хемминг, Численные методы, М., Наука, 1968
- 18 Н.Н.Михельсон, Оптические телескопы, М., Наука, 1976
19. Ch.Owen a.a., Performance of the Apache Point Observatory 3.5-m Telescope. Part II: Pointing and Tracking, in Proc. SPIE, v.1236, 808, 1990

ПРИЛОЖЕНИЕ I.

Представлены поля ошибок наведения и решения системы (4.1) - (4.2) методом наименьших квадратов. Данные приведены для наиболее полных полей в разные годы. Обозначения - как в тексте, $DA = \Delta A \cdot \sin Z$, DDA и DDZ - невязки условных уравнений (остаточные ошибки коррекции).

Азимут A , зенитное расстояние Z и склонение D задаются в градусах, остальные величины - в угловых секундах.