

лонного направления с помощью теодолита *T2000S*; $\sigma_{\text{виз}}$ — средняя квадратическая ошибка наведения зрительной трубы *T2000S* на перекрестье сетки нитей коллиматора. σ_{κ} не превышает $0,26''$. Для определения длиннопериодических ошибок исследования проводились в диапазоне 360° с шагом $\Delta t = 4,5^\circ$. Так как лимб тахеометра *Elta 4* имеет 16200 штрихов, т. е. длина одного периода равна $80''$, то для выявления ошибок интерполятора исследования проводились в диапазоне около 5 периодов нанесения штрихов, с шагом $\Delta t = 4''$. В процессе исследований эталонный угол β задавался путем поворота теодолита *T2000S*. После поворота исследуемого прибора в обратную сторону и наведения на перекрестие сетки нитей коллиматора у *Elta 4* снимался отсчет, равный $(-\beta + \Delta)$. Ошибки датчика исследуемого прибора рассчитывались как сумма $\beta + (-\beta + \Delta)$. График длиннопериодических ошибок датчика направления показан сплошной линией на рис. 4, график ошибок интерполятора — сплошной линией на рис. 5.

IV. Методика оценки суммарной ошибки датчика направления и определения функции поправок

Для определения доминирующих систематических ошибок датчика был использован спектральный анализ [14]. Разработанная компьютерная программа позволяет определять перио-

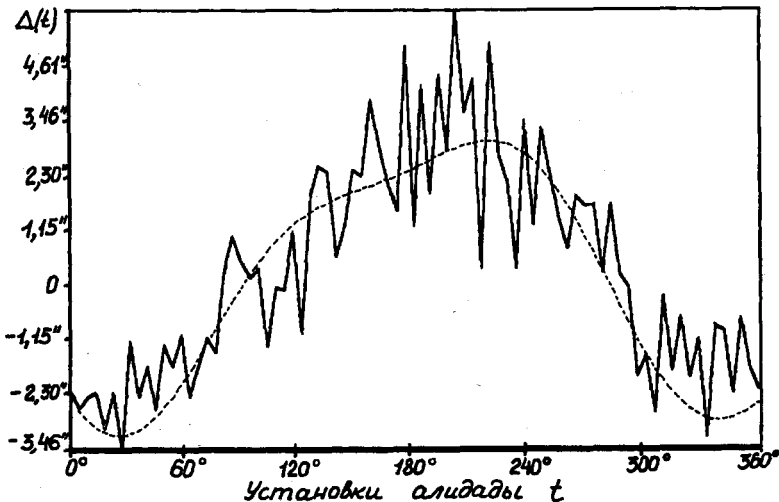


Рис. 4. Длиннопериодические ошибки датчика направления тахеометра *Elta 4*

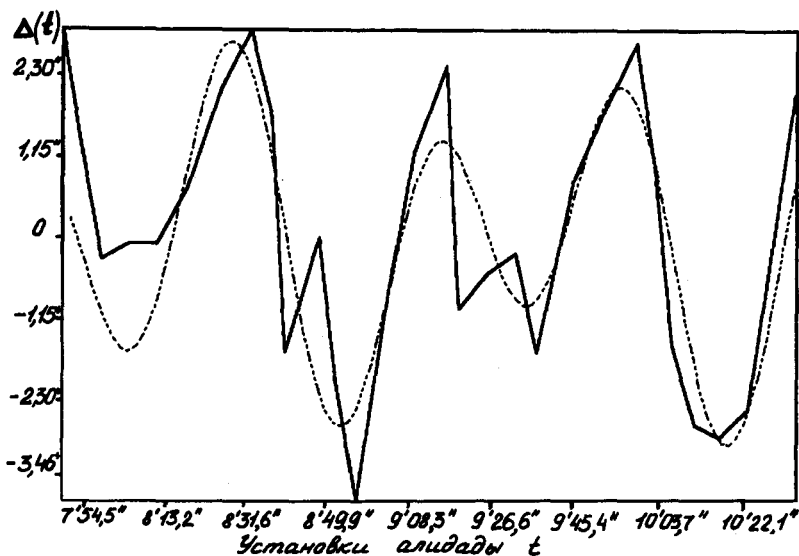


Рис. 5. Ошибки интерполятора датчика направления тахеометра Elta 4

ды T отдельных слагающих синусоид, на которые раскладывается кривая систематических ошибок датчика направления (рис. 6 и 7). По амплитуде этих составляющих можно судить о их вкладе в результирующую ошибку датчика направления (ДН). Для определения степени связи между значениями погрешностей $\Delta(t)$ в точках t и $t + \tau$ графика погрешностей с помощью компьютера рассчитывается и строится автокорреляционная функция

$$r_{\Delta\Delta}(\tau) = \frac{1}{n - \tau} \sum_{t=0}^{n-\tau} \Delta(t)\Delta(t + \tau),$$

где τ — фиксированный сдвиг между кривыми погрешностей, который изменяется от 0 до τ_{\max} ; $\tau_{\max} = 9/10 \times n$ — радиус корреляции; n — максимальная длина функции погрешностей.

Для определения частот $\omega_j = 2\pi/T_j$ отдельных слагающих синусоид Фурье полинома, на которые раскладывается кривая систематических ошибок ДН и которые указывают на причины появления этих ошибок, с помощью компьютера стро-

Кoeffициенты Фурье полинома, аппроксимирующего график ошибок ДН тахеометра Eita-4

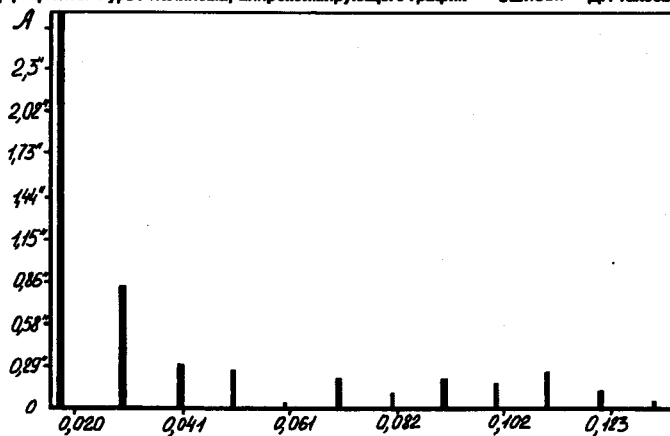


Рис. 6

Кoeffициенты Фурье полинома, аппроксимирующего график ошибок интерполятора ДН (Eita-4)

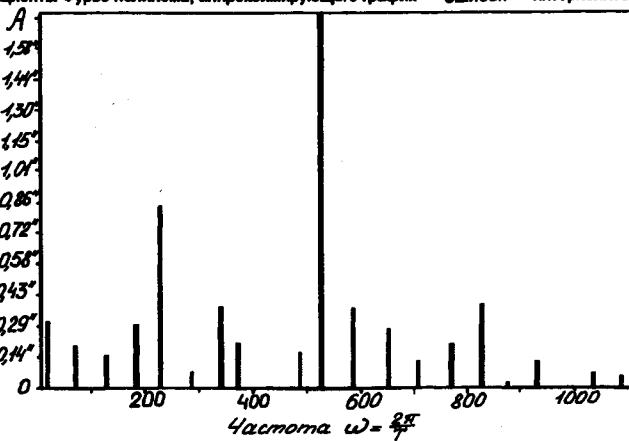


Рис. 7

ится график спектра мощности $S_{\Delta\Delta}(\omega)$. Расчеты выполняются по формуле

$$S_{\Delta\Delta}(\omega) = \frac{1}{\tau_{\max}} \sum_{\tau=0}^{\tau_{\max}} r_{\Delta\Delta}(\tau) \cos \omega\tau.$$

Пики в спектре мощности возникают в том случае, когда экстремумы функции $r_{\Delta\Delta}(\tau)$ совпадают с экстремумами функции $\cos \omega\tau$. С учетом значений ω_j , при которых спектр мощности имеет пики, с целью определения коэффициентов Фурье, составляются уравнения поправок. Уравнения поправок решаются по способу наименьших квадратов. Максимальное значение частоты ω_{\max} , которое ограничивает спектр коэффициентов Фурье, позволяющих восстановить кривую ошибок, может быть рассчитано в соответствии с теоремой Котельникова по формуле

$$\omega_{\max} = \pi / \Delta t,$$

где Δt — минимальный угол поворота алидады или шаг, выбранный для снятия отсчетов при исследовании прибора.

Коэффициенты Фурье тригонометрического полинома вида

$$x(t) = \sum_{j=1}^n A_j \cos(\omega_j t + \varphi_j),$$

аппроксимирующего график ошибок ДН тахеометра *Elta 4*, представлены в табл. 1 и 2. Составляющие спектра, амплитуды которых не превышают 0,3", не учитываются при расчете суммарной ошибки ДН, так как эту величину можно сравнить со средней квадратической ошибкой компаратора.

Таблица 1

Доминирующие длиннопериодические ошибки датчика направления тахеометра *Elta4*

Номер гармоники	Частота	Период	Амплитуда	Ср. кв. ошибка определения амплитуды	Фаза	$\sigma_j = \frac{A_j}{\sqrt{3}}$
j	ω_j	T_j	A_j	σ_A	φ_j	
1	0,0183	343°	2,69"	±0,04"	-0°34'29,4"	-
2	0,03	209°	0,83"	±0,11"	-0°28'40,2"	0,48"

Доминирующие погрешности интерполятора ДН Elta 4

Номер гармоники	Частота	Период	Амплитуда	Ср. кв. ошибка определения амплитуды	Фаза	$\sigma_j = \frac{A_j}{\sqrt{3}}$
j	ω_j	T_j	A_j	σ_A	φ_j	
5	280,7	1'20,6"	0,84"	$\pm 0,02$ "	+0°05'47,4"	0,48"
11	560,4	40,4"	1,74"	$\pm 0,02$ "	-0°00'36,7"	1"

Известно, что влияние первой гармоники, обусловленной эксцентриситетом, исключается при вычислении среднего значения из отсчетов, снятых при "круге лево" и "круге право". Суммарная ошибка ДН тахеометра *Elta 4*, которая обусловлена деформациями лимба (вторая гармоника) [3] и ошибками интерполятора, равна:

$$\sigma_{\text{ДН}} = \sqrt{\sigma_2^2 + \sigma_5^2 + \sigma_{11}^2} = 1,2 \text{ угл. сек.}$$

При расчете предполагалось, что вышеназванные ошибки имеют равномерные функции распределения. Полученное значение $\sigma_{\text{ДН}}$ составляет 40% от величины средней квадратической ошибки измерения горизонтального угла, которая для тахеометра *Elta 4* равна 3". Систематический характер проявления выявленных ошибок позволяет говорить о возможности их исключения с помощью микроЭВМ прибора, что существенно повысит точность измерений. Нельзя не учитывать эту возможность также и для отечественных тахеометров *ЗТа5*.

У. Заключение

В статье предпринята попытка доказать возможность повышения точности измерений горизонтальных направлений и вертикальных углов электронными теодолитами и тахеометрами без внесения существенных усовершенствований в конструкцию прибора и технологию его изготовления. Анализ научно-технической литературы и патентно-технической информации показывает, что несмотря на большое число разработок в области эталонирования высокоточных геодезических приборов для угловых измерений [1,2,4,5,7], остаются акту-

альными вопросы разработки и создания лабораторного метрологического оборудования, которое наряду с обеспечением высокой точности измерений позволит:

— исследовать геодезический прибор в собранном виде с целью определения функции поправок, корректирующей влияние систематических инструментальных ошибок прибора;

— в процессе исследований прибора автоматизировать процесс передачи информации от эталона и от исследуемого прибора в компьютер и последующую обработку этой информации. Это позволит обрабатывать большие массивы данных, с целью оптимального выбора вида функции поправок, экономии времени и исключения случайных ошибок оператора.

Для оптимально выбора вида функции поправок необходим анализ взаимного влияния ошибок и определение их причин. Для этого может быть использовано компьютерное моделирование геодезических приборов.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. с. 1384951 (СССР), МКИ G 01C 1/02. Устройство для контроля погрешностей лимбов. Г.В. Егоров, С.М. Латышев, С. С. Митрофанов, В. П. Петров.— Оpubл. в Б.И., 1988, 03.
2. А. с. 1689756 (СССР), МКИ G 01C1/06. Устройство для контроля дорожек лимбов угломерных приборов/ Б. Я. Яхилевич, Ю.В. Фомкин.— Оpubл. в Б.И., 1991, 11.
3. Елисеев С. В. Геодезические инструменты и приборы. Основы расчета, конструкции и особенности изготовления. Изд. 3-е, перераб. и доп.— М.: Недра, 1973, 392 с.
4. Исследования в области стандартизации, метрологического обеспечения, испытаний приборной продукции топографо-геодезического назначения. Сборник научных трудов ЦНИИГАиК.— М.: ЦНИИГАиК, 1989.
5. Исследования в области стандартизации и метрологического обеспечения приборной продукции топографо-геодезического назначения. Научно-технический сборник по геодезии, аэрокосмическим съемкам и картографии.— М.: ЦНИИГАиК, 1993.
6. Каталог фирмы Heidenhein. Winkelmeßsysteme. Printed in Germany, 9/1997.
7. Каяк Л. К., Мартынов В. Т. Поверка лимбов теодолитов и других угломерных приборов по образцовым многогранным призмам. Измерительная техника, 1968, №3, с. 65—71.
8. Патент фирмы Wild №2166920 МКИ G01S 3/78. Measuring angular deviation. Dr. B. F. Gachter. Application published 14.05.1986.
9. Dangschat H., Taunreut A. E. Winkelkomparator hoher Genauigkeit. F&M 104(1996), 1-2, S. 58-61.
10. Ingensand H. TPM— Ein neues Gerät zur vollautomatischen Prüfung von Teilkreisen in elektronischen Theodoliten. X. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, München— 12— 17. September 1988. S. A 6/1— A6/12.
11. Kahmen H. Vermessungskunde, 18. Völlig neu bearb. und erw. Auflage, de Gruyter Verlag, Berlin 1993.
12. Katowski O., Salzmann W. Der Kreisabgriff im neuen Theomat