

Ю. Б. ВИРОВЕЦ

ОБ ОДНОЙ СУЩЕСТВЕННОЙ ОШИБКЕ УГЛОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

На центральном пункте эталонного углового полигона ЦНИИГАиК [1], предназначенного для исследований по угловым наблюдениям, в 1965 г. были выполнены измерения 15 эталонных углов, образованных из комбинаций всех шести направлений. Центральный пункт полигона представлял собой новый трехгранный сигнал высотой 27 м. Наблюдения выполнялись универсальным инструментом Т-4 Вильда № 64232 (без применения поверительной трубы) на визирные малофазные цели по способу измерения отдельных углов восемью приемами с соответствующими перестановками лимба от приема к приему*.

В 1966 г. после полного завершения работ по созданию эталонного полигона измеренные в 1965 г. углы были сопоставлены с их эталонными значениями (табл. 1).

Из табл. 1 видно, что большинство (9 из 15) измеренных значений превышает эталонные, а в семи случаях расхождения превосходят $1-2''$. Такие значительные расхождения и преобладание одного знака не могли быть объяснены ни ошибками собственно измерений (при оценке по внутренней сходимости они оказались равными $\pm 0,3''$), ни ошибками эталонных углов (менее $\pm 0,3''$). Оставалось предположить, что эти расхождения явились следствием боковой рефракции, а возможно, и неустойчивости сигнала, хотя по оценкам, принятым в производстве, он был хорошим. В целях проверки этих предположений в 1967 г. были выполнены новые измерения эталонных углов как на центральном пункте, так и на двух хороших четырехгранных сигналах высотой по 25 м. На этот раз наблюдения выполнялись теодолитом ОТ-02М № 1, также по способу измерения отдельных углов, 12 приемами. Три эталонных угла на центральном пункте были измерены в 1967 г. дважды (второй раз осенью). Часть углов измерялась с применением поверительной трубы. Теодолит ОТ-02М № 1 (а также ОТ-02М № 821, который использовался для измерений в 1968 г.) был специально отобран и тщательно исследован. Ошибки диаметров кругов не превышали $\pm 0,6''$, увлечений лимба не отмечалось, рен отлично сохранял свою величину в течение всего сезона, то есть этот инструмент оказался вполне пригодным для высокоточных угловых измерений.

Результаты наблюдений 1967 г., приведенные также в табл. 1, подтвердили результаты измерений 1965 г. и показали, что на четырехгранных сигналах тоже получаются значительные отклонения измеренных значений от эталонных, а применение поверительной трубы не освобо-

* Угловые измерения на протяжении всего периода исследований выполнялись при строгом соблюдении всех правил наблюдений.

дило результатов от этих отклонений*. Вместе с тем сходство результатов наблюдений 1965—1967 гг. усилило правдоподобность предположения о значительном влиянии на результаты измерений каких-то, по-видимому, устойчивых факторов, связанных с конструкцией сигналов и их поведением в процессе наблюдений.

Таблица 1

Результаты наблюдений 1965—1967 годов

Угол, °	Трехгранный сигнал $H=27$ м		
	Δ = измеренный угол — эталонный угол, "		
	1965 г. Т-4 июль	1967 г. ОТ-02М № 1 июнь—июль	1967 г. ОТ-02М № 1 сентябрь
51	+1,15	+1,50	
54	+0,10	+0,06	
59	+2,45	+2,08	
62	-0,20	-0,23	
86	-0,14	-0,17	
105	+2,80	+1,76	
111	+0,06	-0,82	
140	-0,75	+1,05	
148	-2,00	-0,18	
165	+1,74	+0,96	
192	+2,25	+2,12	+3,49
202	-0,70	+0,45	+2,04
251	+1,10	+0,95	-1,81
254	+0,37	+2,60	
314	-0,28	-0,05	

Четырехгранные сигналы ($H=25$ м)
июнь—август 1967 года

188	-1,99	
	-2,55	
	-1,29	
	-3,31	
	-0,78	
86	-0,97	
	-1,28	
	-1,59	

Один из таких факторов хорошо известен — это деформация сигнала под влиянием неравномерного нагрева сигнала солнцем, изменения облачности, влажности воздуха, силы и направления ветра и, как следствие ее, кручение столика сигнала. В [2, 3] убедительно показано, что влияние деформации сигнала сильно ослабляется методикой измерения углов уже в одном приеме, а остаточное ее влияние в среднем значении угла не превышает немногих десятых долей секунды.

Поэтому напрашивается вывод, что существуют и другие факторы, действие которых сильнее искажает результаты угловых измерений на сложных сигналах и носит устойчивый для данного знака и угла характер. Мы предположили, что таким фактором может быть гнутие сигнала и кручение его столика под влиянием неизбежного в процессе измерений и при том однообразного перемещения наблюдателей по площадке сигнала. Перед нами встала задача разработать удобный и достаточно

* Зафиксировано, что в пределах 1—1,5" возможно как уменьшение, так и увеличение отклонений некоторых измеренных углов от эталона в результате введения поправок за поверительную трубу.

точный способ определения поправки в результаты измерений за гнутие сигнала и кручение его столика в процессе наблюдений.

Для определения гнутия сигнала мы использовали оптический прецизионный зенит-лот фирмы Цейсс (Йена), который позволяет фиксировать относительные перемещения столика сигнала величиною 0,1 мм при высоте сигнала до 30 м.

Многочисленные опыты, проведенные на нескольких трехгранных и четырехгранных сигналах во время наблюдений на них, показали, что гнутия сигналов не приводят к относительным смещениям столиков, превышающим 0,1 мм при любых перемещениях наблюдателя и его помощника по площадке сигнала. Следовательно, практически гнутие сигнала не может быть причиной заметных искажений результатов измерений.

Для определения величины кручения столика сигнала мы разработали и применили в 1968 г. следующий способ.

На столике сигнала рядом с теодолитом закрепляется коллиматор, в качестве которого может использоваться зрительная труба какого-либо теодолита с прикрепленным к ее окулярному концу патроном для электрической подсветки сетки нитей*. Нами, в частности, использовалась труба с зеркально-линзовой оптикой системы Максудова с фокусным расстоянием 1000 мм. Труба-коллиматор наводится на другую трубу, имеющую окулярный микрометр и установленную на какой-либо подставке на штативе или же столбе, врытом в землю на расстоянии от сигнала, меньшем, чем двойная его высота. В этом случае погрешность в измерении угла поворота столика, вызванная тем, что направление на коллиматор не в горизонте, будет менее 10% (коэффициент $\cos \alpha$ близок к единице).

Мы использовали для наблюдений коллиматора зрительную трубу теодолита ТТ-2/6, имеющую окулярный микрометр с ценой деления 1".

Измерение величины кручения столика в процессе наблюдений выполнялось следующим образом. В течение того времени, когда наблюдатель визирует на каждое наблюдаемое направление, его помощник трижды (для контроля и повышения точности измерений) визирует зрительной трубой, установленной на столбе, на коллиматор, сопровождая каждое визирование отсчетом по окулярному микрометру. Разность отсчетов угла, сделанных им при наблюдении каждого из двух направлений, непосредственно представляет собою суммарную величину кручения столика при измерении этого угла.

Точность измерения угла кручения столика этим способом была определена из специальных опытов, которые заключались в одновременном измерении величины кручения по двум коллиматорам, установленным на столике сигнала с помощью двух зрительных труб, помещенных на разных столбах.

По разностям таких двойных измерений вычислена ошибка определения одним приемом поправки в измеряемый угол за кручение столика сигнала. Она оказалась равной $\pm 0,5''$. Следовательно, при 12 приемах измерений угла поправка к нему определится с погрешностью менее $\pm 0,2''$.

Используя описанную методику, в 1968 г. на тех же пунктах эталонного полигона теодолитом ОТ-02М № 821 был измерен целый ряд эталонных углов. Результаты этих измерений приведены в табл. 2, из которой видно, что поправки k оказались весьма значительными и не учитывать их при высокоточных измерениях нельзя.

* Вместо коллиматора можно также использовать марку, но тогда результаты будут менее точными. Аналогичные по точности результаты может дать метод автоколлимации, но его применение технически усложнит измерения величины кручения.

Рассматривая величины Δ (разности измеренных и эталонных углов) как истинные ошибки углов, измеренных n приемами (одной программой), можно найти ошибку m измерения угла одной программой, без исключения и с исключением влияния кручения столика сигнала, по формуле

$$m = \pm \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{r}},$$

где r — число программ.

Таблица 2

Результаты наблюдений 1968 года

Месяц	Угол, °	Поправки за кручение— k , "	Δ_1 —измеренный угол—эталонный угол, "	Δ_2 —исправленный угол—эталонный угол, "
Трехгранный сигнал $H=27$ м				
июнь	46	-0,45	+0,54	+0,09
июнь	46	-0,60	+0,65	+0,03
июнь	59	-1,78	+2,23	+0,45
сентябрь	59	-1,64	+2,32	+0,68
сентябрь	59	-2,86	+2,68	-0,18
июнь	62	-1,19	+1,34	+0,15
июль	104	+0,24	-0,57	-0,33
август	108	-0,82	+1,17	+0,35
октябрь	111	-0,03	+0,09	+0,06
октябрь	111	-0,01	+0,77	+0,76
октябрь	111	-0,01	-0,25	-0,26
июль	140	+0,83	-2,80	-1,97
август	140	+1,63	-3,20	-1,57
август	165	+1,27	-1,49	-0,22
июль	167	+2,72	+2,77	+0,05
июль	192	-1,22	-1,56	-0,34
сентябрь	192	+2,25	-2,63	+0,38
июнь	194	-2,33	+2,56	+0,23
июль	202	+0,83	-0,79	+0,04
август	202	+2,54	-3,25	-0,71
Четырехгранные сигналы $H=25$ м				
июль	91	-0,75	+1,45	+0,70
июль	94	-0,63	+1,75	+1,12
август	174	+0,75	-0,62	+0,13
июль	185	-0,32	+2,18	+1,86
август	185	-0,56	+1,15	+0,59
июнь	86	+1,90	-1,59	+0,31
июнь	171	-0,88	+0,67	-0,21
август	171	-0,35	+0,86	+0,51
июнь	188	+0,96	-1,11	-0,15
август	188	+0,31	-0,50	-0,19

Оказалось, что по результатам наблюдений 1968 г. на трехгранном сигнале без исключения k величина $m = \pm 1,9''$, с исключением $K = \pm 0,7''$, на четырехгранных сигналах соответственно $\pm 1,3$ и $\pm 0,7''$.

Для наблюдений 1967 г. (18 программ, трехгранный сигнал) $m = \pm 1,6''$ (без исключения k).

Согласно полученным данным, кручение столика четырехгранного сигнала меньше, чем трехгранного, но при учете величины кручения результаты наблюдений на знаках обоих типов оказываются равноточными.

Ф. Н. Красовский в свое время указывал, что наблюдения на сложных сигналах могут сопровождаться ошибкой из-за перемещений наблюдателя по площадке, которую он оценивал средней величиной $\pm 0,3''$. Это его предположение, как видим, подтвердилось нашими исследованиями, но величина ошибки для современных сигналов оказалась существенно большей.

Таким образом, общая средняя квадратическая ошибка $m_{\text{общ}}$ измерения угла на эталонном полигоне после исключения влияния кручения столика сигнала оказалась равной $\pm 0,7''$. Исключим из нее и другие известные нам ошибки: ошибку центрировки $m_1 = \pm 0,2''$; редукции $m_2 = \pm 0,2''$; собственно измерения угла (по внутренней сходимости) $m_3 = \pm 0,3''$; эталонного угла $m_4 = \pm 0,3''$ и определения поправки за кручение столика $m_5 = \pm 0,2''$. Тогда средняя величина совместного влияния боковой рефракции, фазовости визирных целей и других источников ошибок, не учтенных нами, характеризуется величиной $\pm 0,4''$.

Таблица 3

**Кручение столиков геодезических сигналов
различной конструкции и высоты**

Тип сигнала	Высота сигнала, м	Поправка за кручение $k, ''$
Деревянный трехгранный	37	+1,13
" " "	20	+2,84
Металлический четырехгранный	10	+0,37
" " "	12	+1,47
" " "	25	+0,88
" " "	31	-0,64

Поскольку кручение столиков сигналов из-за перемещений наблюдателя оказалось источником весьма существенной ошибки угловых измерений, мы решили определить суммарную величину кручения еще на нескольких сложных знаках разной высоты и конструкции. Эти определения были выполнены в том же 1968 г. еще на шести знаках, но без угловых измерений, а только путем наблюдений коллиматора при перемещении наблюдателя по площадке в таком же порядке, что и при измерении углов. Результаты этих определений приведены в табл. 3.

Данные табл. 3 еще раз подтверждают, что кручение столиков трехгранных и четырехгранных, металлических и деревянных, сложных сигналов любой высоты под воздействием перемещающихся по их площадкам нагрузок (наблюдателя и помощника) — источник значительной погрешности при измерении углов. Эта ошибка для данного сигнала и угла является систематической, но уже в треугольнике из-за различия знака и величины ошибок составляющих его углов может в той или иной степени компенсироваться.

Корреляции между величиной поправки k , высотой сигнала и величиной измеренного угла, согласно табл. 2 и 3, не наблюдается. Отметим, что полученные значения поправок k соответствуют способу наблюдения отдельных углов. При другом способе может измениться и величина поправки.

Ввиду очевидной важности этого вывода для угловых измерений, в дальнейшем была сделана попытка подтвердить явление кручения столика сложного сигнала аналитическими расчетами. По нашей просьбе инженер Бененсон И. И. (ВНИИ подъемно-транспортного машино-

строения) разработал методику и составил программу такого расчета на ЭЦВМ Урал-3 применительно к способу измерения отдельных углов.

Для аналитического расчета были выбраны и обмерены в натуре два металлических сварных сложных сигнала высотой 10 и 31 м, на которых ранее при помощи коллиматора определялись величины кручения столиков. Расчет таких сигналов проще, чем деревянных, так как они более симметричны и имеют сварные, а не гвоздевые соединения основных узлов, поддающиеся лишь весьма приближенному учету.

Не останавливаясь на подробностях этих все же достаточно громоздких расчетов, приведем значения k , измеренные и полученные расчетным путем:

	Высота, м	k изме- ренный, "	k рассчитан- ный, "
Четырехгранный металлический сигнал	10	+0,37	+0,30
" " "	31	-0,64	-1,02

Таким образом, выполненный достаточно строгий аналитический расчет подтвердил не только факт неизбежности кручения столиков сложных сигналов в процессе угловых наблюдений из-за перемещения наблюдателя, но и высокую надежность разработанного и примененного нами способа измерения величин кручения.

Рассмотрим теперь вопрос о возможных и целесообразных способах исключения или хотя бы существенного уменьшения влияния кручения столика сигнала на результаты угловых измерений.

Представляется, что для астрономических азимутальных определений, от которых требуются результаты наивысшей точности, разработанный нами способ может быть принят без всяких оговорок. Он не усложнит работу по наблюдениям, не потребует затраты дополнительного времени, сил и средств и в то же время существенно повысит точность результатов*.

Для геодезических угловых наблюдений применение этого способа в полном объеме, то есть сопровождение измерений каждого угла в каждом приеме наблюдениями коллиматора, оказывается слишком громоздким. Однако представляется перспективным следующее упрощение этого способа. На каждом знаке в период, не пригодный для угловых измерений, можно несколькими приемами измерить поправку k в каждый подлежащий измерению угол, используя главную трубу теодолита в качестве коллиматора и при перемещениях наблюдателя по площадке в том порядке, который соответствует порядку выполнения измерений каждого угла. Найденное таким путем значение k для каждого угла вводится затем в измеренное его значение.

При слабом ветре постоянного направления величина поправки k достаточно устойчива. Если же ветер переменил свое направление и стал порывистым, то поправку k для всех углов данного пункта надо определить еще раз. Согласно нашему опыту, при шести направлениях (15 углах) требуется около 1,5—2 часов для определения всех поправок k 10—12 приемами.

Устойчивость значения поправки k иллюстрируется табл. 4, содержащей значения поправок в два угла за кручение столика трехгранного сигнала, определенных нами в июне—октябре 1968 г. Каждое значение

* Аналитические расчеты и выполненные на сигналах эксперименты с применением электронного уровня показали, что азимутальные определения сопровождаются еще одной ошибкой, вызываемой неустойчивостью сигналов и влиянием перемещающейся по площадке нагрузки. Эта ошибка проявляется в неправильном фиксировании наклонности горизонтальной оси инструмента и может достигать 0,5" (без учета коэффициента $\text{ctg } z$).

Устойчивость значения поправки за кручение столика сигнала с течением времени

Дата и время суток	Условия наблюдения	k (угол $167''$),"	Дата и время суток	Условия наблюдения	k (угол $59''$),"
18.VI, вечер	Переменная облачность, ветер слабый	-2,72	18.VI, вечер	Переменная облачность, ветер слабый	-1,78
19.VI, вечер	Переменная облачность, ветер умеренный	-2,07	19.VI, вечер	Переменная облачность, ветер умеренный	-2,32
17.X, утро	Переменная облачность, ветер слабый	-2,10	2.IX, вечер	Переменная облачность, ветер умеренный	-1,64
17.X, день	Переменная облачность, ветер умеренный	-1,83	3.IX, вечер	Переменная облачность, ветер порывистый, сильный	-2,86
17.X, вечер	Переменная облачность, ветер слабый	-2,36	17.IX, вечер	Переменная облачность, ветер слабый	-2,27
			17.IX, ночь	Переменная облачность, ветер слабый	-1,89

поправки соответствует способу наблюдения отдельных углов (12 приемами).

Данные табл. 4 говорят о том, что в течение 1—2 суток значение поправки k колебалось до $0,7''$ при слабом и умеренном ветре, при сильном же и порывистом ветре это значение изменилось на $1,2''$.

Применение этого способа определения k , как следует из изложенного, должно существенно ослабить влияние кручения столика сигнала и тем самым повысить точность измерения углов, что особенно важно для полигонометрии.

В работе с 1966 г. принимал участие инженер Струков С. П., а с 1967 г. — старший техник Шелахин А. П.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вировец Ю. Б. Эталонный угловой полигон ЦНИИГАиК. «Геодезия и картография», 1967, № 5.
2. Данилов В. В. Отчет по исследованию методов высокоточных угловых наблюдений. Труды ЦНИИГАиК, вып. 11, ОНТИ, М., 1936.
3. Соколов М. Н. Кручение деревянных геодезических сигналов. Труды ЦНИИГАиК, вып. 72, Геодиздат, М., 1950.